

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-
ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Кондраненкова Татьяна Евгеньевна

**РАЗРАБОТКА РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 кВ**

4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение
агропромышленного комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент

Д. Е. Дулепов

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ, ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 кВ, СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ИХ СНИЖЕНИЯ.....	12
1.1 Анализ состояния сельских электрических сетей на примере Нижегородской области.....	12
1.2 Оценка потерь электрической энергии в сельских электрических сетях Нижегородской области.....	18
1.3 Анализ причин возникновения несимметрии токов и напряжений в сельских электрических сетях 0,4 кВ.....	20
1.4 Влияние несимметрии токов и напряжений на качество и потери электроэнергии.....	21
1.5 Анализ существующих способов снижения несимметрии токов и напряжений, потерь электрической энергии в электрических сетях 0,4 кВ.....	25
1.6 Анализ технических средств снижения несимметрии токов и напряжений, потерь электрической энергии в электрических сетях 0,4 кВ.....	30
1.7 Выводы по главе и постановка задач исследования.....	51
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 кВ.....	53
2.1 Разработка способа регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ.....	53
2.2 Математическое моделирование электрической сети 0,4 кВ с регулируемым симметрированием.....	60
2.3 Определение параметров симметрирующего устройства.....	65
2.4 Разработка программы для расчета потерь электрической энергии электрической сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством.....	69

2.5 Исследование переходных процессов в сети с симметрирующим устройством.....	72
2.5.1 Расчет переходных процессов в сети с симметрирующим устройством на ЭВМ.....	73
2.6 Исследование уровня несимметрии токов и напряжений в сельских электрических сетях 0,4 кВ на примере сельских электрических сетей Нижегородской области.....	78
2.7 Исследование дополнительных потерь электроэнергии, связанных с несимметрией токов и напряжений в сельских распределительных сетях 0,4 кВ на примере сельских электрических сетей Нижегородской области.....	89
2.8 Разработка требований к регулируемому симметрирующему устройству.....	90
2.9 Выводы по главе 2.....	91
3 РАЗРАБОТКА НОВОГО РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА.....	93
3.1 Разработка схемы регулируемого симметрирующего устройства для электрической сети 0,4 кВ.....	93
3.2 Разработка схемы управления регулируемому симметрирующему устройству.....	94
3.3 Имитационное моделирование работы регулируемого симметрирующего устройства в сети 0,4 кВ.....	97
3.4 Определение рациональной конфигурации регулируемого симметрирующего устройства.....	120
3.5 Разработка экспериментального образца регулируемого симметрирующего устройства.....	124
3.6 Выводы по главе 3.....	129
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА.....	130
4.1 Разработка и описание экспериментальной установки.....	130
4.2 Программа и методика экспериментальных исследований	

регулируемого симметрирующего устройства.....	134
4.3 Экспериментальные исследования регулируемого симметрирующего устройства и их результаты.....	137
4.4 Выводы по главе 4.....	157
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 кВ.....	158
5.1 Оценка затрат на внедрение РСУ в электрические сети на примере ООО ЗАО «Покровская слобода».....	158
5.2 Оценка экономического эффекта от внедрения РСУ в электрическую сеть ЗАО «Покровская слобода».....	161
5.3 Расчёт экономических показателей применения РСУ в электрической сети ЗАО «Покровская слобода».....	162
5.4 Выводы по главе 5.....	166
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	169
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	183
Приложение А. Патенты и свидетельства.....	184
Приложение Б. Акты внедрения.....	187
Приложение В. Дипломы и сертификаты.....	192
Приложение Г. Программа управления РСУ.....	196

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Современные сельские электрические сети (СЭС) должны обеспечивать надёжное электроснабжение сельских потребителей и высокое качество поставляемой им электроэнергии. В то же время средняя длина по магистрали сельских линий электропередачи 0,4 кВ составляет более 750 метров, средняя доля линий, выполненных самонесущими изолированными проводами (СИП) в среднем по электросетевым предприятиям, обеспечивающим электроснабжение центральных регионов и Приволжья составляет порядка 25-30%, доля линий со сроком нахождения в эксплуатации более 25 лет – более 60%. Это приводит к тому, что потери электроэнергии при её передаче на уровне напряжения 0,4 кВ составляют до 20 % при нормируемых – до 10%. Высокие потери влияют на рост стоимости электроэнергии и, как следствие, на повышение себестоимости сельхозпродукции, что значительно снижает конкурентоспособность отечественных сельхозтоваропроизводителей. Одним из источников дополнительных потерь в сельских электрических сетях является несимметрия токов и напряжений в сети и на зажимах электроприемников. Среднее значение коэффициента дополнительных потерь (K_p), на примере отдельных сельских электрических сетей Нижегородской области, составляет 1,845. Среднее значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности выходит за предел 2 %, установленный ГОСТ 32144-2013 при коммунально-бытовой нагрузке в 80 %, а за предел 4 % – в 29 % времени. Одним из средств снижения уровня несимметрии является применение ёмкостно-индуктивных симметрирующих устройств (СУ), позволяющих нормализовать показатели качества электрической энергии за счёт снижения несимметрии и снижения потерь электрической энергии на 10-20%. При этом существующие симметрирующие устройства данного типа обладают рядом недостатков: значительное собственное потребление электроэнергии, особенно в случае применяются нерегулируемых компенсирующих устройств (таких случаев

большинство); ограниченное ресурсом катушки магнитного пускателя количество переключений ступеней СУ; наличие в конструкции некоторых устройств нелинейных элементов, которые вносят существенное искажение в форму кривой тока; относительно высокая стоимость. Современная преобразовательная техника позволяет создавать новые симметрирующие устройства, которые обладают достаточным быстродействием для симметрирования переменной несимметричной нагрузки различного характера (активно-индуктивная, активно-емкостная) и во многом лишены указанных недостатков. Поэтому тема разработки регулируемого симметрирующего устройства (PCY) для сельских электрических сетей 0,4 кВ является актуальной.

Степень разработанности.

В работах авторов, таких как Т. Б. Лещинская, И. В. Жежеленко, Ю. С. Железко, Г. В. Лукина, А. В. Виноградов [4, 5, 6, 7, 8] и многих других рассмотрены вопросы снижения потерь электрической энергии в распределительных сетях. Однако в этих работах недостаточно рассмотрены вопросы влияния несимметричных нагрузок на энергетические характеристики работы элементов распределительных сетей.

В работах авторов Ф. Д. Косоухова, И. В. Наумова, С. В. Сукьясова, С. В. Подъячих [9, 10, 11, 12] рассматриваются симметрирующие устройства, на основе нелинейных индуктивных элементов, применение которых оказывает воздействие на качество электрической энергии. Устройства переключения нагрузок к наименее загруженной фазе, предложенные М. С. Гринкругом [13] – отличаются сложной схемотехникой и алгоритмами управления. Трансформаторы с вольтодобавочными обмотками, разработанные Г. Н. Самариным и М. Ю. Егоровым [14], сложны и дороги в изготовлении и последующей эксплуатации. Данные устройства не регулируются в зависимости от уровня фазных напряжений, а, следовательно, возможность их применения ограничена в условиях СЭС с преобладающей однофазной нагрузкой потребителей в коммунально-бытовом секторе. Все это требует дальнейших исследований и разработки, регулируемых симметрирующих устройств на основе современной элементной базы.

Целью работы является снижение несимметрии токов (напряжений) и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ за счёт разработки регулируемого симметрирующего устройства.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

1. Выполнить анализ несимметрии токов (напряжений) и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ, существующих способов и средств их снижения.

2. Выполнить теоретическое обоснование применения регулируемого симметрирующего устройства для снижения несимметрии токов (напряжений) и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

3. Разработать новое регулируемое симметрирующее устройство, выполнить его имитационное моделирование и обосновать параметры.

4. Выполнить исследование экспериментального образца регулируемого симметрирующего устройства.

5. Выполнить технико-экономическую оценку применения регулируемого симметрирующего устройства в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

Объектом исследования являются сельские электрические сети 0,4 кВ.

Предмет исследования – несимметрия токов (напряжений) и потери электроэнергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ при использовании регулируемых симметрирующих устройств.

Научная новизна заключается в:

– разработанном новом способе управления регулируемым симметрирующим устройством и алгоритме его реализации;

– результатах математического и имитационного моделирования работы электрической сети 0,4 кВ с регулируемым симметрированием и разработанной программе расчета потерь электрической энергии электрической сети 0,4кВ при использовании симметрирующего устройства;

– разработанном новом регулируемом симметрирующем устройстве.

Научная новизна подтверждена свидетельством о регистрации программы для ЭВМ № 2018614901, патентом РФ на изобретение № 2784455.

Теоретическая значимость.

Проведенные статистические исследования несимметричных режимов работы в сельских электрических сетях 0,4 кВ, а также анализ существующих способов и технических средств нормализации этих режимов позволяют разработать новые мероприятия по снижению несимметрии токов и потерь электрической энергии в этих сетях. Предлагаемая математическая модель с регулируемым симметрированием позволяет определить коэффициент потерь от несимметрии токов и напряжений в сети 0,4 кВ.

Исследования проводились в соответствии с планом НИР вуза.

Практическая значимость работы.

Применение регулируемого симметрирующего устройства позволит в значительной степени снизить несимметрию и потери электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Получен патент на полезную модель, патент на способ регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ. Результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ по дисциплине «Электроснабжение».

Разработанное регулируемое симметрирующее устройство для снижения несимметрии и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях прошло опытную эксплуатацию и внедрено в ЗАО «Покровская слобода» (приложение Б), в МУП «Княгининское ЖКХ» (приложение Б) и ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (приложение Б).

Методология и методы исследования. Для исследований использовались методы теории электротехники, теории линейных цепей, методы инженерного эксперимента. Математическое моделирование проводилось с применением современных методов и компьютерных программных продуктов, в частности, интегрированных пакетов MathCad и MATLAB, лабораторные исследования

проводились на экспериментальной установке, включающей в себя трехфазный автотрансформатор, модель линии электропередачи, несимметричную нагрузку, симметрирующее устройство, щит управления, блок управления на базе Arduino.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

- результаты математического моделирования работы электрической сети 0,4 кВ с регулируемым симметрированием позволяют оценить влияние несимметрии токов (напряжений) на значения потерь электроэнергии и показатели качества электрической энергии в электрической сети 0,4 кВ;

- разработанная программа RASPOТ-1, выполненная на основе результатов проведённого математического моделирования электрической сети 0,4 кВ с регулируемым симметрированием, позволяет выполнять расчет потерь электроэнергии, обусловленных несимметричными режимами в электрической сети 0,4 кВ с учётом результатов работы регулируемого симметрирующего устройства;

- разработанное новое регулируемое симметрирующее устройство, реализующее авторский способ и алгоритм регулирования количества подключаемых ступеней в зависимости от значений отклонений напряжений в каждой из фаз сети, обеспечивает большее снижение потерь электрической энергии, обусловленных несимметричными режимами в электрической сети 0,4 кВ по сравнению с нерегулируемыми симметрирующими устройствами.

Реализация результатов исследования. Изготовленное регулируемое симметрирующее устройство для снижения несимметрии токов (напряжений) и потерь электрической энергии 0,4 кВ прошло испытания в сельскохозяйственном предприятии ЗАО «Покровская слобода», а также в МУП «Княгининское ЖКХ» и ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и полученных результатов базируется на доказанных и корректно использованных выводах математического анализа, математического и имитационного моделирования. Достоверность подтверждена также экспериментальными исследованиями.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 4. 3. 2 – «Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса». Работа соответствует паспорту специальности. Основные результаты работы соответствуют пункту «Способы и технические средства передачи и распределения электроэнергии, принципы построения сельских электрических сетей и их компонентов, надежность и качество электроснабжения, средства мониторинга, автоматизации и интеллектуализации электроснабжения». Сформулированные в работе научные положения соответствуют специальности в области исследования предлагаемого симметрирующего устройства и его алгоритма работы в различных режимах работы сельских электрических сетей.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследований, непосредственном участии в проведении теоретических исследований, разработке экспериментального образца, планировании, проведении и обработке результатов лабораторных и производственных испытаний, апробации результатов исследований, подготовке публикаций по выполненной работе. На работы, выполненные в соавторстве, и заимствованный материал сделаны соответствующие ссылки.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на Международной научной конференции «Социально-экономические проблемы развития малых муниципальных образований» НГИЭИ, Княгинино, 2014; на Всероссийской научно-практической конференции «Устойчивое развитие АПК регионов: ситуация и перспективы» ТГСХА, Тверь, 2015; на Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов образовательных организаций среднего и высшего профессионального образования, Княгинино, 2015 (Приложение В); на 20-й Международной научно-технической конференции НГИЭИ «Социально-экономические проблемы развития муниципальных образований», г. Княгинино, 2016; на Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016». ИГЭУ. Иваново. 2016

(Приложение В); на 37-й Международной научно-практической конференции «Приоритетные научные направления: от теории к практике», Новосибирск, 2017; на VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017», Самара, 2017; на XI Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ - 2018), Чебоксары, 2018 (Приложение В); на III Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы», Княгинино, 2019; на Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Агробиоинженерные инновации в сельском хозяйстве», Москва, 2021; на Международной научно-практической конференции «Энергообеспечение АПК», Москва, 2022.

Публикации. По основным результатам исследований работы опубликовано 19 печатных работ, из них 6 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ. По материалам работы получен патент на полезную модель, патент на изобретение и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Общий объем диссертации 205 с., в том числе 173 с. основного текста, 70 рисунков, 18 таблиц, список литературы из 121 наименования и 4 приложений на 20 страницах.

1 АНАЛИЗ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ, ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 КВ, СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ИХ СНИЖЕНИЯ

1.1 Анализ состояния сельских электрических сетей на примере Нижегородской области

По данным «Нижновэнерго» [15] является филиалом ПАО «Россети Центр и Приволжье» - единой операционной компании с центром ответственности в г. Нижний Новгород, являющейся основным поставщиком услуг по передаче электроэнергии и технологическому присоединению к электросетям во Владимирской, Ивановской, Калужской, Кировской, Нижегородской, Рязанской, Тульской областях, а также в Республике Марий Эл и Удмуртской Республике.

Филиал «Нижновэнерго» осуществляет деятельность по передаче (транспортировке) и распределению электрической энергии от 0,4 кВ до 110 кВ и технологическому присоединению к сетям потребителей Нижегородской области. Территория обслуживания – 76,6 тыс. кв. км с населением – 3,2 млн человек [15].

Общая протяженность линий электропередачи составляет 72 665,3 км, в том числе линий электропередачи напряжением 500 кВ – 791,1 км, 220 кВ – 1850,1 км, 110 кВ – 5435,7 км, 35 кВ – 3064,3 км, 6-20 кВ – 29341 км, 0,4 кВ – 32184,3 км [15]. Магистральные линии электропередачи напряжением 220—500 кВ эксплуатируются филиалом ПАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС, распределительные сети напряжением 110 кВ и менее – филиалом ПАО «Россети Центр и Приволжье» – «Нижновэнерго».

В состав филиала «Нижновэнерго» входят 8 высоковольтных районов электрических сетей (ВРЭС) и 25 районов электрических сетей, отвечающих за электроснабжение Нижнего Новгорода и области.

Филиал обслуживает 15489 трансформаторных подстанций 6-35/0,4 кВ, 242 распределительных пункта 6-10 кВ, 262 подстанций 35 кВ и выше – с установленной трансформаторной мощностью 5,4 тыс. МВА [15].

На рисунке 1.1 представлены данные по объему услуг по передаче электрической энергии «Нижновэнерго» филиала ПАО «Россети Центр и

Приволжье». Представленные данные взяты с сайта ПАО «Россети Центр и Приволжье» [15].

По рисунку видно, что с 2015 по 2021 года произошло значительное снижение отпуска электрической энергии в сеть для всех уровней напряжения «Нижновэнерго». В 2015 году объему слуг по передаче электрической энергии составил 12469 млн. кВт·ч, а в 2021 году 11012 млн. кВт·ч.

Тоже самое наблюдается и для низкого напряжения рисунок 1.2. В 2017 году объем услуг по передаче электрической энергии составил 3556 млн. кВт·ч, в 2020 году 3066 млн. кВт·ч.



Рисунок 1.1 – Объем услуг по передаче электрической энергии Нижновэнерго

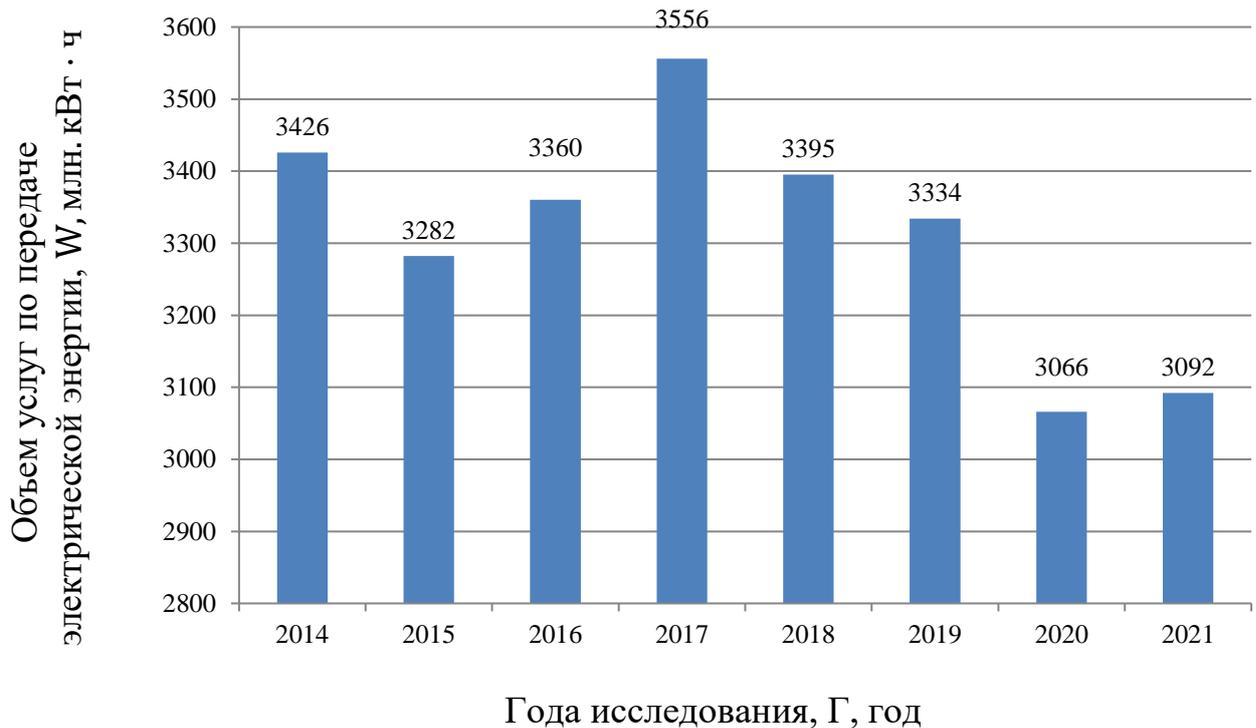


Рисунок 1.2 – Объем услуг по передаче электрической энергии Нижновэнерго (уровень напряжения НН)

По данным [16, 17] потребление электрической энергии сельскохозяйственными потребителями составляет 29,53 млн. кВт·ч или 4 % от общего объема потребления области. Развитие АПК региона напрямую связано с надежной и качественной работой сельских распределительных электрических сетей (СРЭС) [18].

По СРЭС передается потребителям различных категорий в разные годы в пределах от 8 до 15 % от всей вырабатываемой в России электроэнергии. Это обуславливало подход к сооружению СРЭС исходя из условия минимума капитальных вложений, часто в ущерб надежности электроснабжения и качеству электрической энергии [19].

Особенностями электрической сетей в сельской местности являются:

- большая протяженность преимущественно воздушных линий электропередачи и их значительная разветвленность;
- низкая удельная плотность изменения нагрузки из-за большой разбросанности потребителей;
- большой диапазон изменения нагрузок в течение суток;

- недостаток информации о режимах электрических нагрузок;
- малые типоразмеры электрооборудования;
- небольшие величины токов коротких замыканий в конце линий электропередачи, соизмеримые с токами максимальных нагрузок в начале линий;
- подверженность влиянию атмосферных явлений;
- продолжительное время отыскивания повреждений, особенно на линиях 10 кВ.

Распределительные электрические сети напряжением 10-0,4 кВ по месту расположения и характеру потребителей считаются сельскими и осуществляют электроснабжение объектов сельской инфраструктуры и сельскохозяйственного производства. Они находятся на более низком иерархическом уровне управления и располагаются ближе к потребителям [20].

Одна из проблем систем электроснабжения сельских потребителей - это неудовлетворительное техническое состояние распределительных сетей, питающих сельскохозяйственные потребители [20], следствием которого явилось ненадежное электроснабжение, высокие тарифы и низкое качество электроэнергии, от которых страдают все потребители электроэнергии, и в большей степени сельхозпроизводители и жители сельских регионов [21]. Решение этих проблем является основной задачей российской компании ПАО «РОССЕТИ» и других собственников распределительных сетей.

К основным проблемам сельских сетей напряжением 10 - 0,4 кВ относится низкая надежность сетей, большие потери электроэнергии и низкое качество поставляемой электрической энергии [20]. Техническое состояние половины сельских сетей считается неудовлетворительным, отключения воздушных линий 0,4 и 10 кВ составляют от 40 до 90 % от общего количества аварийных отключений. Часто причиной низкого качества электроэнергии является большая протяженность сельских линий 10 кВ. Оптимальной длиной упомянутых линий считается 8 - 12 км, однако 13,3 % данных линий длиннее 25 км, а у 35% сельских потребителей вечером напряжение падает до 190 – 200 В [21].

Воздушные линии напряжением 0,4-10 кВ построены по радиальному принципу с использованием, в основном, алюминиевых неизолированных

проводов малых сечений, а также деревянных и железобетонных опор с механической прочностью не более 27 – 35 кН·м. Линии электропередачи напряжением 0,4 – 10 кВ проектировались по критерию минимума затрат [19], а расчётные климатические условия принимались с повторяемостью один раз в 5 – 10 лет. Вследствие чего распределительные сети, как правило, состоят из ненадёжных элементов (высокая повреждаемость КТП 10/0,4 кВ, низкая механическая прочность опор и проводов) [21].

Трансформаторные подстанции 35-110 кВ укомплектованы трансформаторами с РПН только на 68% от общего количества трансформаторов, что приводит к отклонению напряжения на шинах потребительских подстанций выше предельно допустимых значений. Технический уровень и срок службы силовых трансформаторов и электрооборудования в значительной мере являются показателями надёжности сети и определяют допустимые значения продолжительности отключений [21]. По оценке специалистов компании ПАО «РОССЕТИ», произведённой и опубликованной в «Положении ПАО «РОССЕТИ» о единой технической политике в электросетевом комплексе» [20], более половины парка силовых трансформаторов требует замены.

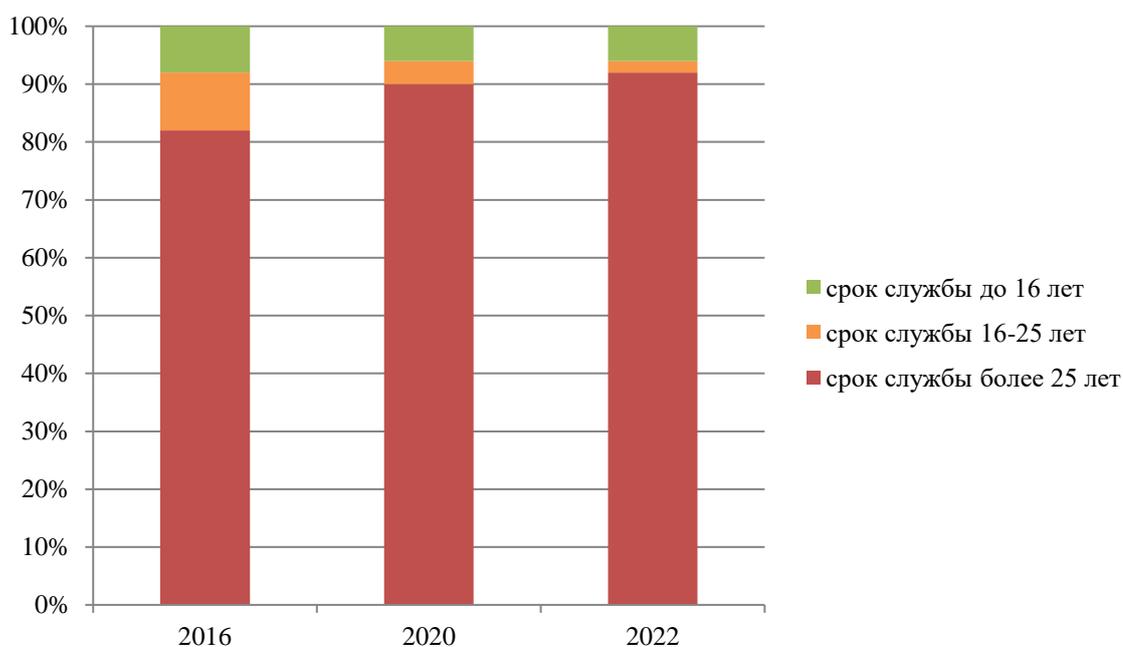


Рисунок 1.3 – Состояние парка трансформаторов подстанций напряжением 35 кВ энергосистемы Нижегородской области [20]

Как видно из рисунка 1.3, на данный момент доля установленной трансформаторной мощности на ПС с высшим напряжением 35 кВ со сроком службы 25 и более лет составляет около 82%, а в 2022 году достигает уровня 92%.

Согласно данным дирекции энергосбережения ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» количество установленных трансформаторов 10(6)/0,4 в филиале Нижновэнерго составляет 18 288. Установленных с 2018 года с указанием доли трансформаторов с классом энергоэффективности X2K2 и выше – 1 143 и 87 соответственно.

В докладе об итогах производственной деятельности электросетевых организаций ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» за 2021 год были представлены сведения об аварийных отключениях электрических сетей за 2020-2021 годы. В филиале Нижновэнерго количество аварийных отключений в 2020 году составляет 2488, а в 2021 году – 1946.

Так же в докладе за 2021 год были представлены сведения о причинах 14298 аварийных отключений электрических сетей 0,4 кВ, обслуживаемых 20 филиалами компании.

Причинами аварийных отключений ВЛ 0,4 кВ являются:

- падение деревьев (веток) 38 %;
- воздействие сторонних лиц 22%;
- воздействие ветровых нагрузок, в том числе схлесты 13 %;
- износ оборудования (старение, потеря механической прочности) 13%;
- несвоевременное выявление и устранение дефектов 6%;
- несвоевременная вырубка деревьев 5 %;
- воздействие атмосферных перенапряжений 2 %;
- воздействие животных и птиц 1 %.

Техническое состояние более половины сельских сетей Нижегородской области является неудовлетворительным, отключения воздушных линий 0,4 и 10 кВ составляют от 40 до 90% от общего количества аварийных отключений [21, 22]. Это указывает на низкую надежность электроснабжения и вызывает

огромные материальные потери сельхозпроизводителей, а так же определенную социальную напряженность в сельскохозяйственных районах [20, 21].

1.2 Оценка потерь электрической энергии в сельских электрических сетях Нижегородской области.

В настоящее время, в результате увеличения количества сельских хозяйств в Нижегородской области, наблюдается непропорциональное распределение электроэнергии в сети 0,4 кВ (однофазное и трехфазное).

По данным [15] отпуск электрической энергии в сеть в 2021 году для филиала Нижновэнерго ПАО «Россети Центр и Приволжье» составил 12646 млн. кВт·ч, а отпуск электрической энергии из сети 11466 млн. кВт·ч. Фактические (отчетные) потери электрической энергии в сети составляют 1180 млн. кВт·ч, т.е. 9,33% для всех уровней напряжения.

Фактические (отчетные) потери электроэнергии определяют как разность электроэнергии, поступившей в сеть, и электроэнергии, отпущенной из сети потребителям. Эти потери включают в себя составляющие различной природы: потери в элементах сети, имеющие чисто физический характер, расход электроэнергии на работу оборудования, установленного на подстанциях и обеспечивающего передачу электроэнергии, погрешности фиксации электроэнергии приборами ее учета и, наконец, хищения электроэнергии, неоплату или неполную оплату показаний счетчиков и т. п.

Для низкого напряжения отпуск электрической энергии в сеть на 2021 составил 3092 млн. кВт·ч, отпуск электрической энергии из сети 2720 млн. кВт·ч, т.е. потери электрической энергии, составляют 372млн. кВт·ч - 12,03 %.

К сравнению в 2020 году отпуск электрической энергии в сеть составила 3066 млн. кВт·ч, отпуск электрической энергии из сети 2527 млн. кВт·ч. Фактические (отчетные) потери электрической энергии в сети составляют 539 млн. кВт·ч, т.е. 17,58% для низкого напряжения.

На рисунке 1.4 представлена динамика потерь электроэнергии в электрических сетях Нижегородской области для сетей низкого напряжения за

2014-2021 годы [15]. Относительные потери достигли своего пика в 2017 году, после чего потери электроэнергии оставались на высоком уровне, превышающем 15 %. Снижение наблюдается только в 2021 году и потери составляют 12,03 %.

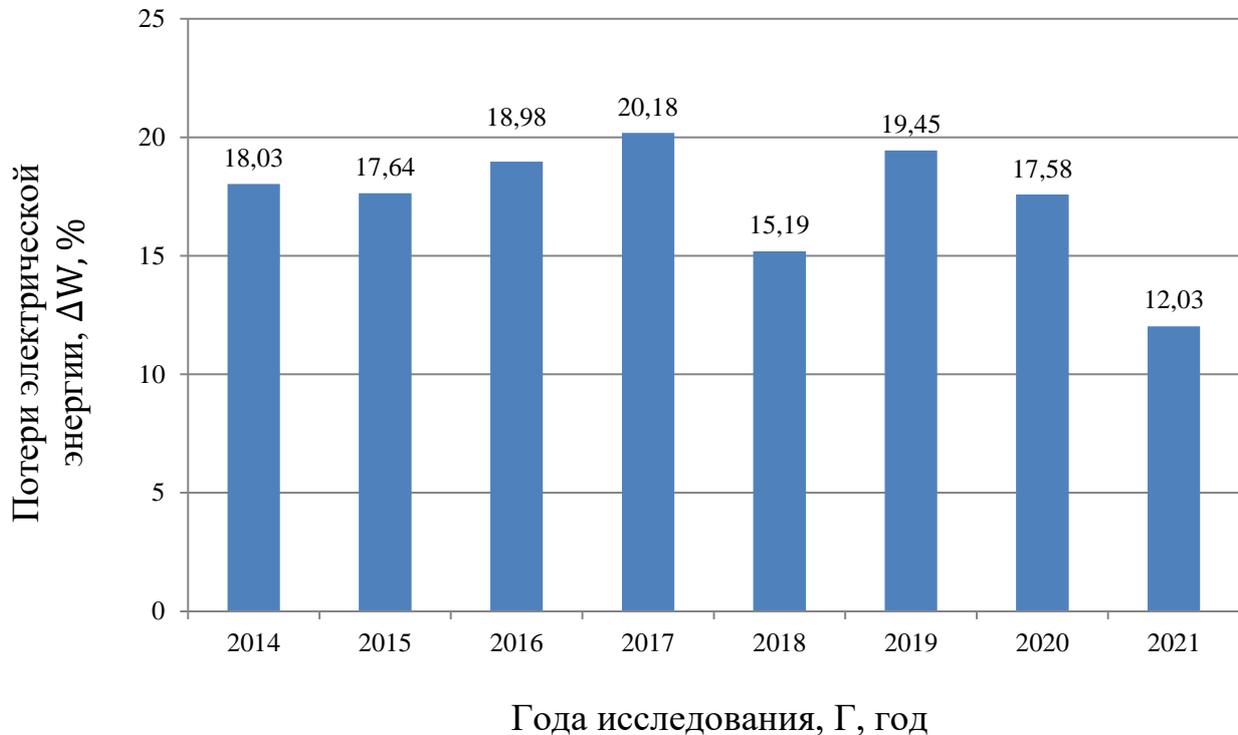


Рисунок 1.4 – Фактические (отчетные) потери электрической энергии в процентах от отпуска электрической энергии в сеть Нижновэнерго (уровень напряжения НН)

Решением региональной службы по тарифам Нижегородской области от 23.10.2010 №48/2 (в редакции от 25.12.2017 № 68/4) установлен уровень нормативных потерь 10% [25]. Из рисунка 1.4 видно, что реальные потери превышают норматив на протяжении всего времени.

Из опубликованных данных «О затратах филиала «Нижновэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья» известно, что затраты на покупку потерь электроэнергии филиала Нижновэнерго за 2021 год составили 3693 млн. рублей, а в 2020 году 4162 млн. рублей [26].

По опубликованным данным потери электрической энергии в действующих сетях сельскохозяйственного назначения напряжением 0,4 кВ составляют 31...33%, а с учетом потерь электроэнергии в трансформаторах 10/0,4 кВ потребительских подстанций (ТП) они достигают 50...55% от общих потерь [1, 2].

Снижение потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ позволит добиться снижения потерь в электрических сетях сельскохозяйственного назначения.

Эффективность использования электрической энергии определяется в основном созданием таких условий её потребления, при которых обеспечивается требуемое качество электрической энергии и минимум производительных потерь.

1.3 Анализ причин возникновения несимметрии токов и напряжений в сельских электрических сетях 0,4 кВ

За последние годы произошло значительное увеличение установленной мощности электрооборудования сельскохозяйственных предприятий, а также в быту сельских жителей. По численности и составу электроустановок, требованиям к надёжности их электроснабжения и качеству электроэнергии они приблизились к промышленным потребителям. Основной отличительной чертой современного сельского электроснабжения является то, что сельскохозяйственные потребители сосредоточили на своем балансе значительное количество линий электропередачи, трансформаторных подстанций, электродвигателей и других производственных и бытовых электроустановок [1].

Симметричная трехфазная система напряжений представляет собой одинаковые по модулю и фазе напряжения во всех трех фазах, а при несимметричных режимах напряжения в фазах отличаются.

Несимметричные режимы в электрических сетях возникают по следующим причинам:

- 1) неодинаковые нагрузки в различных фазах;
- 2) неполнофазная работа сети;
- 3) различные сопротивления фазных проводов линий (что может быть связано с разным значением переходных сопротивлений на контактах, в местах соединений проводов и т.п.).

Наиболее часто несимметрия напряжений возникает из-за неравенства нагрузок фаз и снижения нагрузок трёхфазных потребителей (электродвигателей,

мощных трехфазных нагревателей). Если 25-30 лет назад трёхфазная нагрузка составляла более $2/3$ общей нагрузки сети 0,4 кВ, то в настоящее время её доля менее $1/3$. В значительной степени это связано с тем, что в последние годы в структуре сельских потребителей значительно возросла доля бытовых и коммунальных [21].

В сельских, в том числе и городских сетях 0,4 кВ, несимметрия напряжений является следствием подключения однофазных осветительных и бытовых электроприемников малой мощности. Таких электроприемников достаточно большое количество, поэтому их необходимо равномерно распределять по фазам для уменьшения несимметрии.

Кроме этого, причиной несимметрии могут служить аварийные ситуации в сетях, таких как несимметричные короткие замыкания или обрывы фаз. В силу этого происходит неслучайная несимметрия или «перекос фаз», который представляет собой перегрузку одних фаз, и недогрузку других. Согласно [26] равномерное распределение нагрузок в сетях низших напряжений обеспечивает снижение потерь в сетях на 15-20%. Однако случайные включения и отключения однофазных нагрузок определяют наличие, помимо неслучайной несимметрии, случайной или вероятностной. Таким образом, даже в сетях с равномерным распределением нагрузок будет иметь место несимметричный режим, основной составляющей, которой будет вероятностная несимметрия.

1.4 Влияние несимметрии токов и напряжений на качество и потери электроэнергии.

Одной из самых сложных задач, решаемых при проектировании и эксплуатации электроснабжения, является обеспечение качества электрической энергии на зажимах приемников электроэнергии и снижение ее потерь при распределении [1].

Степень несимметрии трехфазной четырехпроводной системы характеризуется коэффициентами несимметрии токов и напряжений по обратной и нулевой последовательностям [28, 29]. При этом потери мощности,

обусловленные несимметрией токов, могут характеризоваться коэффициентом потерь мощности, равным отношению потерь мощности в несимметричном режиме, к соответствующим потерям мощности, обусловленным протеканием токов прямой последовательности. Коэффициенты несимметрии напряжений и потери мощности могут принимать любые численные значения, которые обуславливаются степенью несимметрии напряжений. Чем данные больше коэффициенты, тем сильнее отрицательное воздействие несимметрии сети на работу электроустановок [1].

Значение показателей качества электроэнергии регламентирует ГОСТ 32144-2013 [28].

В соответствии с ГОСТом [28], несимметрия трехфазной системы напряжений оценивается двумя основными показателями качества:

- коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} , %;
- коэффициентом несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} , %.

Широкое применение однофазных установок значительной мощности различного рода приводит к значительному увеличению доли несимметричных нагрузок, вызывая тем самым несимметрию токов (появление токов нулевой и обратной последовательностей). При этом происходит смещение нулевой точки системы фазных напряжений, обуславливая тем самым несимметрию напряжений [1].

Коэффициенты несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности являются нормированными показателями качества электрической энергии, к ненормированным показателям относятся коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностей [1].

Качество электрической энергии по коэффициентам несимметрии напряжений обратной и нулевой последовательностей считают соответствующими требованиям стандарта, если в 100% времени интервала (10 минут) в одну неделю эти показатели не выходят за пределы максимальных (предельно допустимых) значений, а в 95% этого интервала они не превышают

нормальных значений. Нормально допустимое и предельно допустимое значение коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности в точках передачи электрической энергии 0,4 кВ согласно ГОСТ равны 2,0 и 4,0% соответственно [28].

Нормы ПКЭ, установленные стандартом, являются обязательными во всех режимах работы систем электроснабжения общего назначения, кроме режимов, обусловленных непредвиденными обстоятельствами [1].

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности характеризует трехфазную систему напряжений основной частоты по отклонению междуфазных (фазных) напряжений от симметрии. При этом учитывается не только неравенство действующих значений напряжений в трех фазах сети, но также и относительный угловой сдвиг фазы между ними [1].

Значения коэффициентов несимметрии напряжений определяются в процентах по формулам [28]:

$$\underline{K}_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% , \underline{K}_{0U} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\% , \quad (1.1)$$

где \underline{U}_2 – комплексное значение напряжения обратной последовательности, В;

\underline{U}_1 – комплексное значение напряжения прямой последовательности, В;

\underline{U}_0 – комплексное значение напряжения нулевой последовательности, В.

Коэффициенты несимметрии токов обратной \underline{K}_{2I} и нулевой \underline{K}_{0I} последовательностей определяют аналогично [11, 31]:

$$\underline{K}_{2I} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\% , \underline{K}_{0I} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\% , \quad (1.2)$$

где \underline{I}_2 – комплексное значение напряжения обратной последовательности, А;

\underline{I}_1 – комплексное значение напряжения прямой последовательности, А;

\underline{I}_0 – комплексное значение напряжения нулевой последовательности, А.

В результате исследований установлено, что каждому проценту величины коэффициента несимметрии напряжений соответствует 1,73% дополнительного отклонения напряжения [1].

Отклонения в меньшую сторону фазных напряжений у сельских потребителей, подключенных к концу питающей линии 0,4 кВ, часто не соответствуют требованиям стандарта в часы пиковой нагрузки [31].

При отклонении напряжения -10% , активные потери двигателя увеличиваются на 2% , увеличивается ток асинхронного двигателя, что приводит к преждевременному старению изоляции обмоток и в конечном итоге выходу его из строя. На каждый процент увеличения напряжения потребление электроэнергии сопровождается увеличением реактивной мощности двигателя на 3% . Повышение напряжения сверх номинального на 1% для ламп приводит к увеличению потребляемой мощности на $1,5\%$, светового потока на $3,7\%$, срок службы сокращается на 15% . Увеличение напряжения на 3% сокращает срок службы на 30% . Понижение напряжения на 5% уменьшает световой поток на 18% , а при его снижении до 20% запуск люминесцентных ламп не возможен [1, 32, 33, 34].

Авторами [1, 35] доказано, что при снижении напряжения по одной фазе на 10% , увеличивается время разгона на 7% , рабочая скорость снижается на $0,5\%$, а так же наблюдается непостоянство электромагнитного момента и скорости двигателя. При колебаниях напряжения более 15% может быть нарушена номинальная работа электродвигателя с возможным отключением от сети. Это обусловлено изменением формы магнитных полей статора и ротора под воздействием токов обратной последовательности, что приводит к возникновению противодействующего момента и снижению располагаемой мощности двигателя.

Относительно установившихся отклонений напряжения, которые стандарте называются также «медленные изменения напряжения», то допускаются положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не более 10% от номинального или согласованного значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю [14, 28].

Снижение уровня несимметрии токов и напряжений позволяет нормализовать ПКЭ, снизить потери электрической энергии.

По опубликованным данным, потери электроэнергии в линиях напряжением 0,4 кВ и питающих трансформаторах 10/0,4 кВ при коэффициентах несимметрии токов по нулевой и обратной последовательностям, равных 25-30 %, возрастают по сравнению с симметричным режимом работы сети на 30-50 % [14, 35].

Снижение потерь электрической энергии является одной из важнейших задач, решение которой требует разработки новых технических средств для эффективной работы АПК.

Наиболее значимые последствия несимметрии токов и напряжений, конечно, связаны с низким качеством электроэнергии. Это, безусловно, так, но нельзя забывать и о других негативных воздействиях. Токи нулевой последовательности, протекающие по нейтральному проводнику в несимметричном режиме, значительно его нагревают, что может привести к коротким замыканиям и условиям для возникновения пожаров, а так же приводят к увеличению дополнительных потерь активной мощности и электрической энергии. Доказано [36], что дополнительные тепловые потери, обусловленные несимметричным электропотреблением, могут разрушать изоляцию нейтрального и фазного проводников, что является основной причиной коротких замыканий и, как следствие, пожаров.

1.5 Анализ существующих способов снижения несимметрии токов и напряжений, потерь электрической энергии в электрических сетях 0,4 кВ

Существующие способы, направленные на симметрирование фазных токов в распределительной сети 0,4 кВ, ведущие к снижению дополнительных потерь и улучшению качества электрической энергии [37], можно разделить на следующие группы:

- Периодическое выравнивание по фазам трёхфазной сети однофазных нагрузок (перераспределение однофазных нагрузок);
- Уменьшение сопротивления нулевой последовательности отдельных элементов электрической сети (трансформаторов потребительских ТП и линий электропередачи);

- Применение замкнутых и полужамкнутых схем;
- Поперечная компенсация реактивной мощности [37].

Рассмотрим эти способы более подробно.

Перераспределение однофазных нагрузок. Данный способ является самым простым и наиболее доступным в условиях эксплуатации электрических сетей. В трехфазных четырехпроводных линиях электропередачи одинаковость значений токов, обеспечивается за счет правильного распределения однофазных нагрузок по фазам. Применение данного способа дает возможность существенно уменьшить несимметрию напряжений и токов в электрических сетях с коммунально-бытовой и административной (смешанной) нагрузками [37].

Выравнивание нагрузок фаз наиболее актуально для городских и сельских электрических сетей 0,4 кВ, так как они характеризуются значительным преобладанием однофазных потребителей.

Наблюдения в распределительных сетях 0,4 кВ отдельных хозяйств Нижегородской области показали, что правила симметричного подключения однофазной нагрузки нарушаются в 90% случаев. Такая халатность службы электрификации отдельных хозяйств, приводит к тому, что хозяйство терпит значительные убытки от низкого качества и дополнительных потерь электрической энергии, обусловленных несимметрией напряжений и токов, но не предпринимает мер для обеспечения перераспределения нагрузок. Следует отметить, что некоторые хозяйства не имеют даже средств контроля распределения нагрузки, простых токоизмерительных клещей [37].

Вместе с тем, перераспределение нагрузок производить необходимо, так как проведенными исследованиями установлено, что потери электрической энергии, обусловленные несимметрией напряжений и токов, могут быть снижены на 15...20 %. Кроме того, значительно улучшается качество электрической энергии и, в первую очередь, такие основные показатели качества как отклонение напряжения, коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжения [37].

Поэтому, для минимизирования несимметрию напряжений и токов необходимо проводить следующие мероприятия [37].

1. Периодический (не реже одного раза в год) контроль состояния несимметрии токов и напряжений в распределительной сети 0,4 кВ, путем осуществления замеров этих величин на трансформаторной подстанции (ТП).
2. Замена неполнофазных ответвлений на полнофазные.
3. Составление карты (схемы) распределения нагрузок в сети, и осуществление дальнейших подключений в соответствии с этой схемой.

Использование принципа перераспределения нагрузок по фазам сети эффективно только для снижения систематической несимметрии, но слабо работает в сетях, где нагрузка имеет случайный характер и когда нет возможности спрогнозировать или рассчитать величину тока нагрузки и их равномерность по фазам в конкретный момент времени [37].

Снижение сопротивления нулевой последовательности элементов электрической сети. Сокращение дополнительных потерь мощности, обусловленных несимметрией токов в сети 0,4 кВ возможно при уменьшении сопротивления нулевой последовательности её отдельных элементов. Вместе с тем, пользоваться этим способом необходимо весьма осторожно, так как исследованиями, проведёнными в Санкт-Петербургском ГАУ установлено [37], что уменьшение сопротивления R_0 сети приводит к увеличению в ней токов нулевой и обратной последовательностей, т.е. к увеличению коэффициентов K_{01} и K_{21} . Поэтому увеличение сечения нулевого провода более 0,75 сечения фазного провода не приводит к заметному снижению дополнительных потерь мощности в сельских распределительных сетях. Кроме того, известно, что сечения фазных и нулевого проводов выбираются по экономическим нагрузкам, которые соответствуют минимуму приведённых затрат. Переход на следующий номинал сечения провода требует дополнительных капитальных вложений, которые составляют 6% от стоимости сети 0,4 кВ. Это приводит к неоправданному удорожанию сети 0,4 кВ [37].

В [39] предлагается в качестве инструмента по снижению сопротивления нулевой последовательности линии использовать фонарный провод, как способ увеличения сечения нулевого провода. Однако данный способ не применим для снижения несимметрии токов по тем же причинам, что и непосредственное увеличение сечения нулевого провода. Кроме того, подключение осветительного провода на параллельную работу с нулевым проводом возможно только в дневное время суток, тогда как значительная несимметрия нагрузок проявляется в наибольшей мере в вечерние часы.

Снижение сопротивления нулевой последовательности сети 0,4 кВ может быть достигнуто заменой трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулём» на трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг с нулём».

В сельских распределительных сетях 0,4 кВ наиболее распространёнными в настоящее время являются трансформаторы с соединением обмоток по схеме «звезда-звезда с нулём». Это обусловлено тем, что они имеют более простое конструктивное выполнение и меньшие размеры, а, следовательно, и меньшую стоимость по сравнению с трансформаторами с другой схемой соединения обмоток. К ним присоединяются как трёхфазные, так и однофазные электроприёмники. Однако эти трансформаторы имеют большое сопротивление токам нулевой последовательности, которое в среднем в 10 раз, а иногда и более, превышает сопротивление прямой последовательности [37].

В трансформаторах с соединением обмоток по схеме «звезда-зигзаг с нулём» на каждом сердечнике имеет место магнитное равновесие между первичными и вторичными ампервитками при однофазной нагрузке. Сопротивление нулевой последовательности вторичной обмотки таких трансформаторов пропорционально потокам рассеяния, создаваемым полуобмотками, расположенными на общем сердечнике. При правильном конструктивном выполнении обмоток этот поток рассеяния может быть уменьшен до нуля и индуктивность нулевой последовательности тоже может быть сведена к нулю.

Соединение обмотки трансформатора «в зигзаг» требует большого расхода цветного материала. Вес обмотки, при прочих равных условиях, увеличивается

приблизительно на 7%, а количество цветного материала увеличивается в 1,16 раза. Поэтому общий вес цветного материала всего трансформатора получается на 7...8 % больше, чем при соединении обмотки низшего напряжения «в звезду» [39]. В целом, из-за дополнительного расхода обмоточного провода, стоимость трансформатора с соединением обмоток по схеме «звезда-зигзаг с нулём» увеличивается на 30% по сравнению с трансформаторами с соединением обмоток по схеме «звезда-звезда с нулём» [40].

Трансформаторы с малым сопротивлением нулевой последовательности со схемой «звезда-зигзаг с нулём» и другие позволяют существенно снизить в узлах нагрузки напряжение нулевой последовательности. В связи с этим, их применение целесообразно в сельских сетях 0,4 кВ с коммунально-бытовой нагрузкой для повышения качества электрической энергии [37].

Применение замкнутых и полужамкнутых схем сети 0,4 кВ. Снижение несимметрии токов за счёт дополнительного эффекта выравнивания нагрузок фаз может быть получено при переводе сети 0,4 кВ в режим полужамкнутой или замкнутой сети [41, 42, 43, 44, 45]. В первом случае замыкается сеть, питающаяся от одного распределительного трансформатора (РТ), во втором – от нескольких РТ. Наиболее благоприятно, в отношении выравнивания нагрузок по фазам, замыкание линий, присоединяемых к одному распределительному трансформатору, потому что напряжение на клеммах трансформатора при этом будет одинаково по величине и по фазе для всех линий. В этом случае точки токораздела устанавливаются между точками питания для каждой из фаз линии. Выравнивание нагрузки будет больше, чем будет больше число замыкаемых линий сети низшего напряжения [37].

Выравнивание нагрузки фаз в замыкаемых линиях снижает несимметрию напряжений вдоль линии. Поскольку в каждой из замыкаемых линий величины и фазы симметричных составляющих токов и напряжений являются случайными величинами [43], то математическое ожидание напряжения обратной последовательности составляет 33% от максимального в незамкнутых линиях [45].

Замыкания сети благоприятно сказывается на выравнивании нагрузок фаз и перераспределении симметричных нагрузок между участками сети. При замыкании сети повышается качество напряжения, уменьшаются потери за счёт разгрузки нулевого и фазных проводов. Но при этом необходимо учитывать следующее:

- в замкнутой сети, которая содержит в себе несколько распределительных трансформаторов, неизбежно будут протекать уравнительные токи, которые будут создавать дополнительные потери мощности и электрической энергии;
- экономическая эффективность данного способа уменьшается с увеличением числа замыкаемых магистралей.

Поперечная компенсация реактивной мощности. Использование конденсаторных установок поперечной компенсации реактивной мощности электрических сетей для снижения несимметрии токов достаточно полно рассмотрено во многих источниках [46, 47, 48, 49].

Путём несимметричного распределения по фазам мощностей конденсаторных батарей, предназначенных для компенсации реактивной мощности в электрической сети, можно одновременно с повышением коэффициента мощности добиться компенсации токов обратной последовательности в линии и трансформаторе. Следует отметить, что этот способ может быть применим в том случае, когда обеспечивается определённая стабильность несимметрии нагрузок в сети, что характерно для наиболее нагретой точки обмотки трансформатора [37].

1.6 Анализ технических средств снижения несимметрии токов и напряжений, потерь электрической энергии в электрических сетях 0,4 кВ

К техническим средствам, обеспечивающим снижение несимметрии токов в сельских распределительных сетях 0,4 кВ, относятся следующие:

- 1) Использование устройств автоматического подключения однофазной нагрузки к наименее загруженной фазе сети;

- 2) Установка в электрической сети нейтралеров;
- 3) Применение симметрирующих устройств.

Автоматическое подключение однофазной нагрузки к наименее загруженной фазе сети. Сущность данного способа заключается в том, что в трёхфазной несимметричной системе при помощи специальных устройств к наименее загруженной фазе подключается однофазная нагрузка. В качестве однофазной нагрузки могут быть нескольких квартир многоэтажного дома. Применение данных устройств приводит к уменьшению тока нулевой последовательности и потерь мощности, а также улучшению качества электрической энергии. Но применить данный способ для сельских распределительных сетей трудно, потому что довольно-таки трудно подобрать однофазную автоматически переключаемую нагрузку соответствующей мощности и при этом снижается надёжность электроснабжения потребителей. К тому же оборудование для измерений и коммутации таких устройств технически сложное [1].

Использование нейтралеров. Снижение несимметрии фазных напряжений электроприемников может быть достигнуто не только увеличением сечения нулевого провода, но и уменьшением его длины. Это достигается путём перемещения нейтрали непосредственно к однофазным электроприемникам. При этом электрическая сеть выполняется трёхпроводной с линейным напряжением равным номинальному напряжению трёхфазных электроприемников. На вводе одного из них устанавливаются нейтралеры, которые представляют собой трёхфазные электромагнитные аппараты, с соединенной обмоткой по схеме встречного зигзага [10, 31, 44, 50].

Место включения нейтралера выбирается таким образом, чтобы сопротивление нулевой последовательности не превосходило заданного значения [39]. В результате использования нейтралера снижается неравномерность распределения токов по фазам, что ведет к ослаблению несимметрии напряжения и сокращению потерь в наиболее загруженной фазе, повышению пропускной способности линии. При этом нейтралер способствует увеличению однофазных

токов короткого замыкания, что повышает надёжность защиты низковольтной сети [1].

Применение симметрирующих устройств. Применение симметрирующих устройств является одним из действенных способов решения обозначенной проблемы.

Симметрирующие устройства бывают трех видов:

- конденсаторные и электромагнитные шунтосимметрирующие устройства (ШСУ), за счет подключения в сеть реакторов и конденсаторных батарей, основанных на минимальном сопротивлении токам нулевой последовательности, за счет замыкания на себя этих токов;

- компенсационные СУ – за счет включения в рассечку нулевого провода трансформатора компенсационной обмотки СУ. Малый диапазон симметрирования;

- преобразующие СУ – за счет использования преобразующих статических устройств как-то: выпрямители, тиристорные регуляторы, высокочастотные преобразователи электромашин постоянного тока, использование электронных балластов в осветительных газоразрядных приборах и т. д.

Применение симметрирующих устройств приводит к значительной экономии при обслуживании электроустановок, а также приводит к снижению электропотребления из сети.

В общем случае симметрирующие устройства условно можно разделить на следующие основные группы:

- конденсаторные и электромагнитные шунтосимметрирующие устройства;
- симметрирующие устройства трансформаторного типа;
- регулируемые симметрирующие устройства.

Конденсаторные и электромагнитные симметрирующие устройства

Симметрирующие устройства емкостно-индуктивного и индуктивно-ёмкостного типа. Такие устройства можно отнести к категории фильтров. Эти

устройства также называются шунтосимметрирующими (ШСУ) [31, 52]. ШСУ обладают минимальным сопротивлением токам нулевой последовательности, большая часть этих токов замыкается на участке, где ШСУ подключается. Данные устройства как бы замыкают на себя (шунтируют) токи нулевой последовательности и почти не пропускают их на другие участки линии 0,4 кВ.

ШСУ устанавливают в начале или в конце линии и подключают параллельно нагрузке. Напряжение нулевой последовательности на нагрузке будет минимальным и определяется только сопротивлением нулевой последовательности ШСУ. Поэтому, снижаются потери на этом участке сети, и уменьшается напряжение нулевой последовательности в узле нагрузки. Ёмкостно-индуктивные и индуктивно-ёмкостные типы, таких устройств представлены на рисунке 1.5. Элементы устройств этих типов устройств имеют простую конструкцию, обладают свойством симметрирования, а также осуществляют компенсацию реактивной мощности токов прямой последовательности [32, 52, 53, 54, 55].

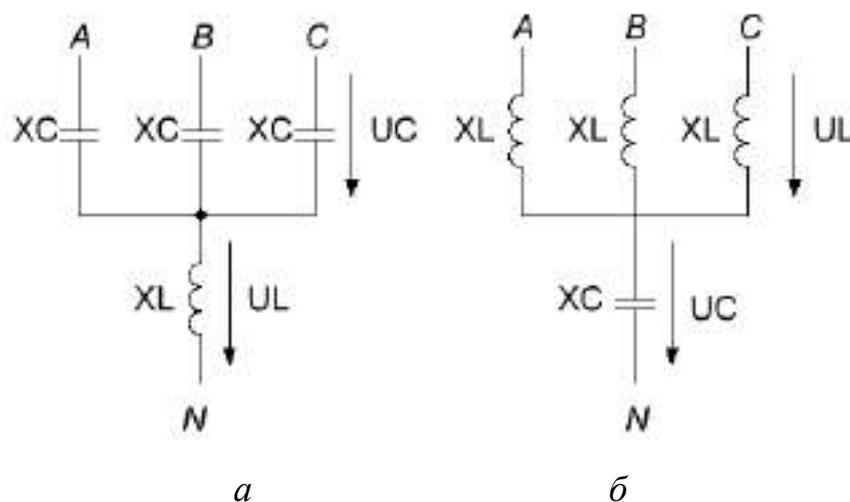


Рисунок 1.5 – Симметрирующие устройства:

a – ёмкостно-индуктивного типа, *б* – индуктивно-ёмкостного типа [56, 57, 58, 59]

Величина сопротивлений нулевой последовательности таких устройств будет минимальной и определяются практически активным сопротивлением индуктивных катушек [1]. Так как эти устройства работают в режиме резонанса напряжений нулевой последовательности, то при больших токах этой же последовательности напряжения на отдельных элементах могут достигать значительной величины.

Как показал анализ работы различных схем КСУ, их существенным недостатком является зависимость параметров КСУ от параметров несимметричной нагрузки. Поэтому с изменением несимметричной нагрузки необходимо осуществлять и регулирование параметров симметрирующего устройства [10].

Симметрирующие устройства с саморегулируемой индуктивностью.

Главной задачей устройства является повышение качества симметрирования токов и напряжений в трехфазной сети с нулевым проводом за счет саморегулирования индуктивности при изменении тока нулевой последовательности [7].

На рисунке 1.6, представлена схема устройства (саморегулируемой индуктивности). Устройство (саморегулируемая индуктивность) содержит цилиндрическую катушку, стальной сердечник электротехнической стали, цилиндрическую спиральную пружину в основании устройства [60].

На рисунке 1.7, представлена схема включения саморегулируемой индуктивности в шунто-симметрирующее устройство, которое содержит три ёмкостных элемента и саморегулируемую индуктивность.

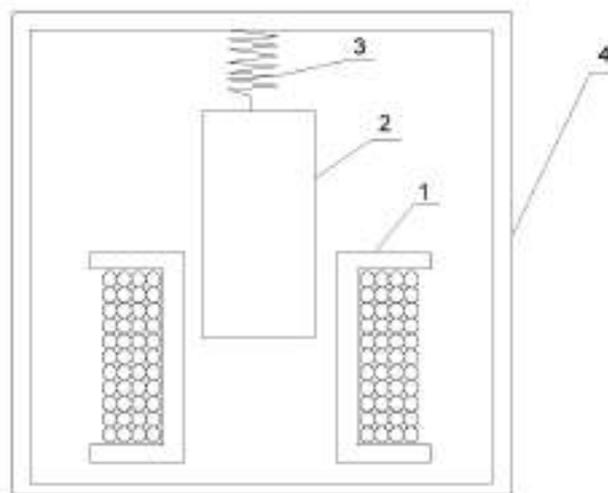


Рисунок 1.6 – Устройство саморегулируемой катушки индуктивности [60]:

1 – цилиндрическая индуктивная катушка; 2 – стальной сердечник из электротехнической стали; 3 – цилиндрическая спиральная пружина; 4 – основание устройства

Принцип действия устройства заключается в следующем: до запуска установки в работу стальной сердечник за счет собственного веса входит в цилиндрическую катушку на малое расстояние сила тяжести сердечника уравнивается силой растяжения пружины. При подключении шунто-симметрирующего устройства к трехфазной четырехпроводной сети при несимметричном режиме через цилиндрическую катушку начинает протекать ток нулевой последовательности. При прохождении тока через катушку в ней возникает магнитное поле, которое внутри цилиндрической катушки равномерно распределяется [6]. Сердечник 2 втягивается внутрь. Так как ток в этот момент в катушке неизменен то внешний источник (ток нулевой последовательности) должен затратить энергию на увеличение потока сцепления, что составляет половину энергии магнитного поля. Другая половина расходуется на покрытие механической работы перемещения сердечника. При неизменном токе увеличение потока сцепления приведет к увеличению индуктивности, и шунто-симметрирующая система работает в резонансе. При увеличении несимметрии увеличивается ток нулевой последовательности, тем самым, увеличивается энергия электромагнитного поля вызывая увеличение индуктивности катушки при снижении тока нулевой последовательности магнитная энергия уменьшается, тем самым, уменьшая индуктивность т.е. происходит саморегулирование индуктивности за счет равновесия сил, при этом энергия сторонних сил не используется, а работа осуществляется за счет тока нулевой последовательности. Можно сказать, что катушка индуктивности регулирует свою индуктивность в зависимости от величины проходящего через него тока, следовательно, реактивная проводимость катушки индуктивности является функцией тока нулевой последовательности [11].

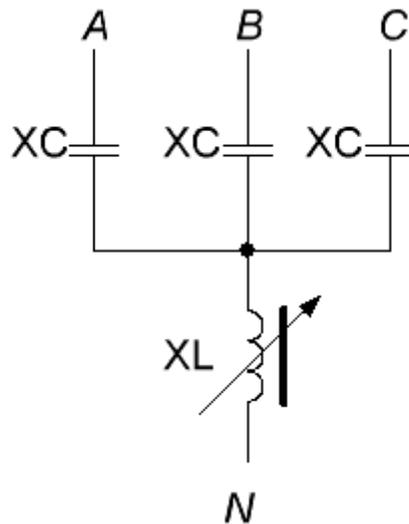


Рисунок 1.7 – Схема включения саморегулируемой индуктивности в ШСУ [6]:

XC – емкостные элементы; XL – индуктивная катушка

Преимуществом является то, что проводимость катушки индуктивности саморегулируется проходящим через неё током нулевой последовательности [11].

Недостатками данного устройства являются:

1. Отсутствие возможности регулировки параметров емкостных элементов при изменении величины несимметрии в трехфазной сети.
2. Невозможность устойчивого регулирования индуктивности из-за колебаний сердечника при изменении тока в катушке.
3. Устройство обладает внутренним сопротивлением и создает дополнительные потери в электрической сети.

Симметрирующие устройства трансформаторного типа.

Трансформаторные симметрирующие устройства могут выполняться на базе обычных трансформаторов (ТСУ с пульсирующим магнитным полем) и ТСУ с вращающимся магнитным полем.

Трансформаторное симметрирующее устройство представляет собой статический преобразователь трёхфазной симметричной системы токов и напряжений в однофазную систему. Он выполняется на базе обычного трёхфазного двухобмоточного трансформатора. При определённых соотношениях параметров нагрузки и фазопреобразующих элементов система токов в первичной обмотке трансформатора становится симметричной [10].

Установлено, что использование ТСУ целесообразно в тех случаях, когда в одном аппарате совмещаются трансформатор потребительской ТП и симметрирующее устройство, позволяющее одновременно с симметрированием фазных токов осуществлять компенсацию потоков реактивной мощности [61].

Теоретические исследования потерь мощности от несимметрии токов в сети 0,4 кВ с различными схемами соединения обмоток трансформаторов, проведенные профессором СПбГАУ Ф.Д. Косоуховым, позволили ему сделать вывод о том, что замена трансформатора с большим сопротивлением нулевой последовательности трансформатором с малым сопротивлением нулевой последовательности приводит к увеличению потерь мощности от несимметрии токов в линии 0,4 кВ [53, 54]. Экспериментальные исследования потерь мощности в сети 0,4 кВ, выполненные на физической модели сети, подтвердили вывод Ф.Д. Косоухова [32].

Схема СУ трансформаторного типа представлена на рисунке 1.8. Конструктивно СУ выполнено на трёхстержневом магнитопроводе со схемой соединения обмоток «встречный зигзаг» с минимальным сопротивлением токам нулевой последовательности. Применение данного ШСУ электромагнитного типа невозможно по всей длине трёхфазной четырёхпроводной линии электропередачи 0,4 кВ, поскольку наибольший эффект такого устройства – в ближайшем к шинам источника питания узле нагрузок.

Симметрирование фазных напряжений обеспечивается за счёт наличия в устройстве трёхфазного электромагнитного устройства, обмотки которого соединены по схеме встречного зигзага (рисунок 1.8). Это связано с тем, что этот аппарат обладает малым сопротивлением нулевой последовательности, и все токи нулевой последовательности, созданные несимметричной нагрузкой, замыкаются через данное устройство. Сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей устройства соответственно равны [10].

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_2 = 600 \text{ Ом.} \\ Z_0 = 0,03 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (1.1)$$

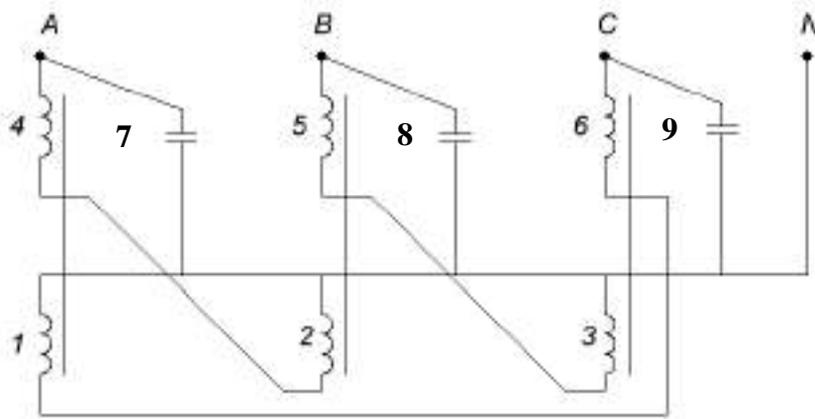


Рисунок 1.8 – Шунто-симметрирующее устройство с соединением обмоток по схеме встречного зигзага [64, 62, 65]

1,2,3,4,5,6– индуктивная катушка; 7,8,9 – емкостные элементы

При подключении ШСУ к сети, содержащей нелинейные и несимметричные нагрузки, токи высших гармоник, кратные трём, а также токи нулевой последовательности, замыкаются через данное устройство. По опубликованным данным [66], при любой степени несимметрии нагрузок (вплоть до обрыва одной из фаз) смещение нейтрали в месте подключения ШСУ не превышает 1,5% фазного напряжения сети [10].

Недостатком данного устройства является неизменность его параметров, что не позволяет осуществить регулирование мощности устройства при вероятностном характере несимметрии токов в электрической сети. ШСУ является индуктивной нагрузкой, увеличивает реактивную составляющую тока прямой последовательности, что приводит к снижению коэффициента мощности сети [11].

Симметрирование токов и напряжений выполняют с использованием делителей напряжения или автотрансформаторов, где последние преобразуют напряжение до требуемой величины и фазы на реактивных элементах схемы, для лучшей их загрузки по мощности [67]. Простейшая схема изображена на рисунке 1.9, *а*.

На рисунке 1.9, *б* приведена схема для симметрирования нагрузки переменного характера. Симметрирование выполняется с помощью изменения величины емкости или индуктивности.

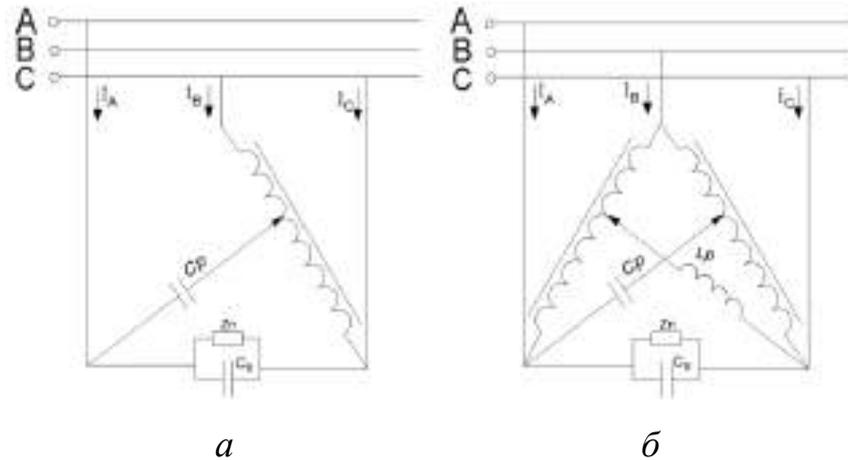


Рисунок 1.9 – Схема симметрирующего устройства [63, 68]:

a – с автотрансформатором и конденсатором; *б* – с автотрансформатором, конденсатором и катушкой индуктивности

Схема характеризуется достаточно высоким коэффициентом мощности [69]. Данная схема не нашла широкого применения из-за большого числа реактивных элементов и своей сложности.

Для симметричной фильтрации тока нулевой последовательности I_0 нулевой провод сети подключён к точке фазосдвигающего элемента ШСУ, совпадающей на топографической диаграмме с центром тяжести треугольника линейных напряжений (рисунок 1.10).

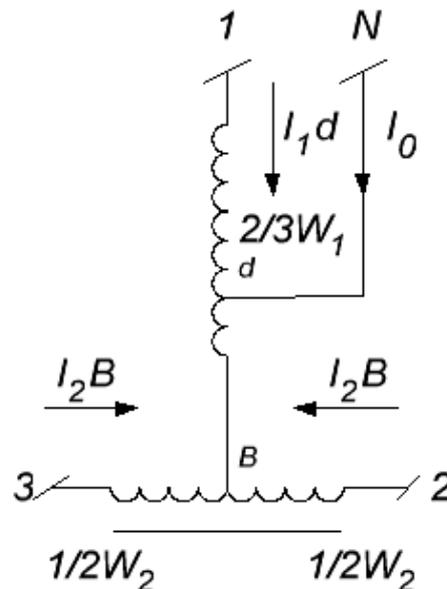


Рисунок 1.10 – Шунтосимметрирующее устройство с Т-образным соединением двух автотрансформаторов [70]

ШСУ представляет собой Т-образное соединение двух автотрансформаторов с числом витков w_1 , и w_2 . Для симметричной фильтрации тока необходимо, чтобы выполнялись следующие соотношения [70]:

$$\begin{aligned}w_{1d} &= 2w_1/3 \\w_{1b} &= w_{3b} = w_2/2 \\w_{db} &= w_1/3\end{aligned}\tag{1.2}$$

Недостатки: при выполнении соотношений 1.2 нет возможности плавного регулирования.

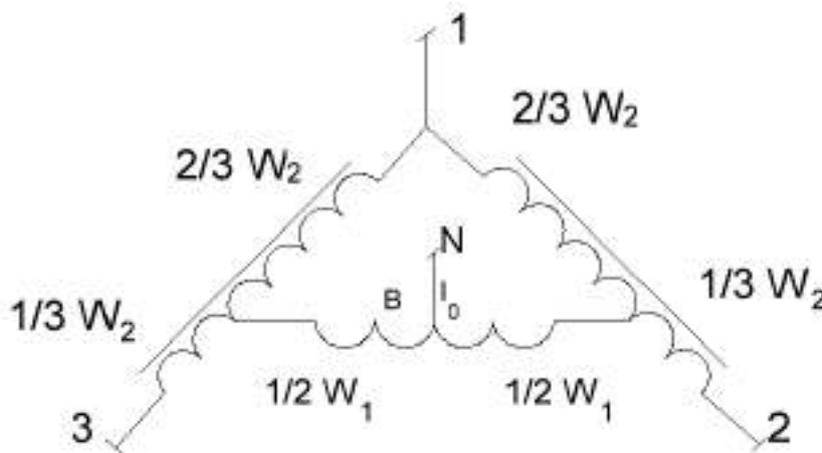


Рисунок 1.11 – Шунтосимметрирующее устройство с А-образным соединением трёх автотрансформаторов [70]

Устройство (рисунок 1.11) представляет собой А-образное соединение трёх автотрансформаторов [70].

Схема ШСУ трансформируется в Т-образное соединение, когда автотрансформатор с числом витков w , одним из концов подключается к фазе 2 или 3, а вторым - к среднему выводу другого автотрансформатора [10].

Недостатками является то, что автотрансформаторы имеют незначительные коэффициенты трансформации (не выше 2), поскольку при $k > 2$ они невыгодны, а также отсутствие гальванической развязки между первичной и вторичной цепью.

Регулируемые симметрирующие устройства

Ступенчато регулируемые симметрирующие устройства. Изменение параметров нагрузки сети приводит к недопустимой несимметрии токов (напряжений). Для решения данной проблемы необходимо использовать симметрирующие устройства с регулируемыми параметрами.

На рисунке 1.12 представлен способ управления симметрирующими элементами по схеме Штейнметца [71].

Симметрирующее устройство состоит из постоянно включенных дросселя L и конденсаторной батареи C , а также из нескольких групп емкости $C_1 - C_n$, каждая из которых либо с помощью контакторов $2K_1 - 2K_n$ может быть подключена к емкости C , либо с помощью контакторов $1K_1 - 1K_2$ к дросселю L . Если все группы емкости включить параллельно, то емкостный ток и симметрирующая мощность будут максимальными. Дроссель выбирается таким образом, чтобы индуктивный ток был равен емкостному току. Следовательно, мощности батареи конденсаторов и дросселя должны быть выбраны равными:

$$Q_e = Q_{\text{и}} = P_0/\sqrt{3}. \quad (1.3)$$

При переключении части емкости ΔC из емкостной ветви в индуктивную, суммарный емкостный ток уменьшится:

$$\Delta I_e = U\omega\Delta C. \quad (1.4)$$

В то же самое время емкость ΔC , подключенная параллельно дросселю, компенсирует часть индуктивного тока, и результирующий индуктивный ток тоже оказывается меньше:

$$\Delta I_{\text{и}} = U\omega\Delta C. \quad (1.5)$$

Следовательно, переключение части емкости из емкостного плеча в индуктивное равноценно увеличению реактивных симметрирующих сопротивлений, а обратное переключение эквивалентно уменьшению этих сопротивлений, в то время как индуктивное сопротивление дросселя остается неизменным [71].

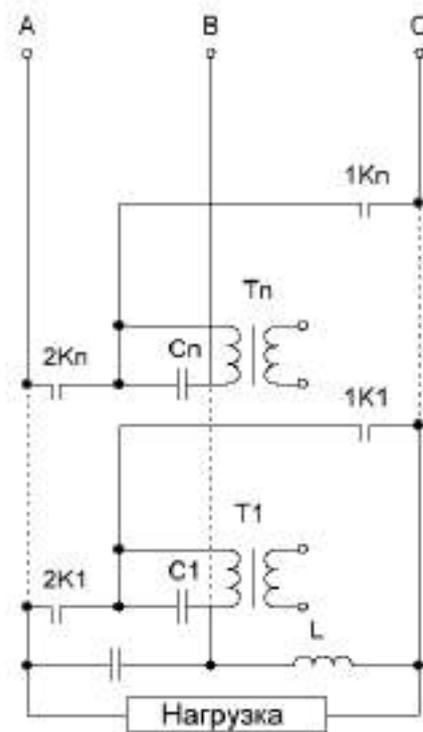


Рисунок 1.12 – Симметрирующее устройство по схеме Штейнметца, управляемое переключением емкости [71]

Преимущества рассмотренного симметрирующего устройства [72]:

- 1) изменение реактивных симметрирующих элементов может осуществляться под нагрузкой в самых широких пределах;
- 2) значительно упрощается и удешевляется дроссель, который выполняется не регулируемым;
- 3) значительно упрощается настройка устройства, так как требуется обеспечить лишь равенство максимальных значений реактивных токов, чем автоматически будет обеспечено равенство токов на всех ступенях.

Недостатком данного устройства является то, что активные потери постоянны и не зависят от уровня симметрирующей мощности. Так же необходимо акцентировать внимание на то, что устройство предусматривает ручной контроль реактивных токов и переключение контакторов [72].

На рисунке 1.13 представлена схема с дросселем-делителем в управляемом исполнении. При изменении активной мощности нагрузки, меняется величина

токов обратной последовательности, путем отключения емкостей $1C_1, 2C_1, \dots, 1C_n, 2C_n$, или переключения емкостного плеча на индуктивное [72].

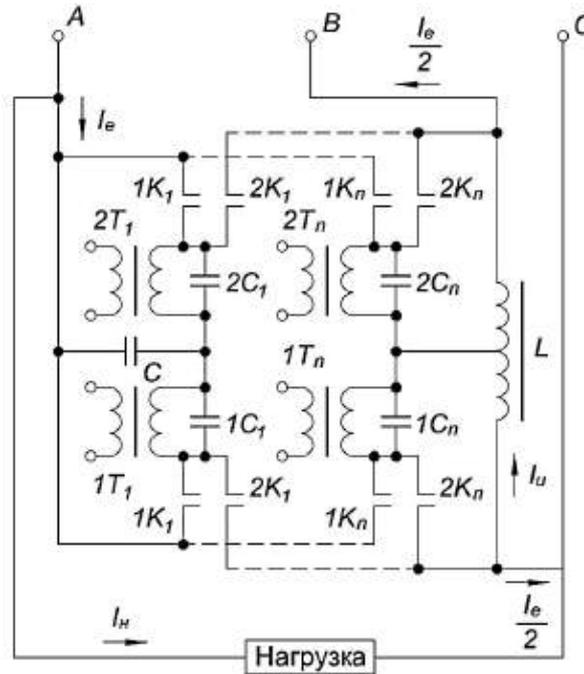


Рисунок 1.13 – Управляемое симметрирующее устройство по схеме Штейнметца с дросселем-делителем [67]

Если сравнивать управляемое симметрирующее устройство, представленное на рисунке 1.12 и устройство по схеме Штейнметца с дросселем-делителем, то преимуществом второго является меньшая величина переключаемой емкости. Включение конденсаторов сопровождается относительно большими бросками тока, так как ток включения практически ограничивается только сопротивлением сети, к которому подключена батарея [72].

При переключении емкости в индуктивное плечо для изменения уровня мощности на одну и ту же величину ток включения в схеме с дросселем-делителем при прочих равных условиях на 20-30% меньше, чем в схеме Штейнметца [72]. Это объясняется тем, что ступень в схеме с дросселем-делителем состоит из двух частей, которые включаются на линейное напряжение последовательно [73].

Но при увеличении симметрирующей мощности и переключении емкости из индуктивного плеча в емкостное в схеме с дросселем-делителем требуется

регулировать большую по мощности ступень емкости, причем обе части этой ступени включаются параллельно постоянно включенной емкости. Ток включения в схеме с дросселем-делителем на 25% больше, чем в схеме Штейнметца [67].

Управляемые симметрирующие устройства по схеме Штейнметца и схеме с дросселем-делителем устанавливаются на стороне низкого напряжения при питании индукционных плавильных тигельных печей от трехфазного трансформатора. Симметрирующие устройства могут быть использованы для некоторых индукционных нагревательных установок прямого (контактного) нагрева со значительным изменением потребляемой мощности в процессе нагрева при времени цикла не менее нескольких минут [72].

На кафедре электроэнергетики и электрооборудования Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПб ГАУ) разработано фильтросимметрирующее устройство (ФСУ) для трехфазной сети с нулевым проводом [74]. Оно предназначено для снижения потерь и повышения качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ.

Устройство [74] (рисунок 1.14) содержит три конденсаторных батареи (КБ), соединенных в звезду, каждая из которых состоит из трех (и более) отдельных конденсаторов, соединяемых параллельно [94]: 1-я батарея имеет конденсаторы 1, 2, 3; 2-я – 4, 5, 6; 3-я – 7, 8, 9. В нулевой точке КБ «0» подключается последовательно рабочая обмотка 10 магнитного усилителя (МУ), обмотка управления 11 которого питается от выпрямителя 14 через резисторы 12 и 13. Таким образом, три КБ и рабочая обмотка 10 МУ, включенная между нулевым проводом N сети и нулевой точкой 0 КБ, соединены последовательно, и работают в режиме резонанса напряжения.

Электрическая цепь ФСУ «КБ – МУ» настраивается в резонанс при емкостях 1 – 4 – 7 изменением тока подмагничивающей обмотки управления МУ с помощью резисторов 12, 13. Если в трехфазной сети 0,4кВ имеет место недокомпенсация реактивной мощности, то с помощью контактов 16 включают вторую секцию КБ 2, 5, 8, одновременно шунтируют резистор 13; при этом

увеличивается ток подмагничивания I_0 , возрастает насыщение ферромагнитных сердечников МУ, изменяется их магнитная проницаемость и индуктивность L_p рабочих обмоток 10. Дальнейшее увеличение эффекта компенсации реактивной мощности сети достигается включением, с помощью контактов 17, третьей ступени КБ 3, 6, 9 и одновременным шунтированием резистора 12.

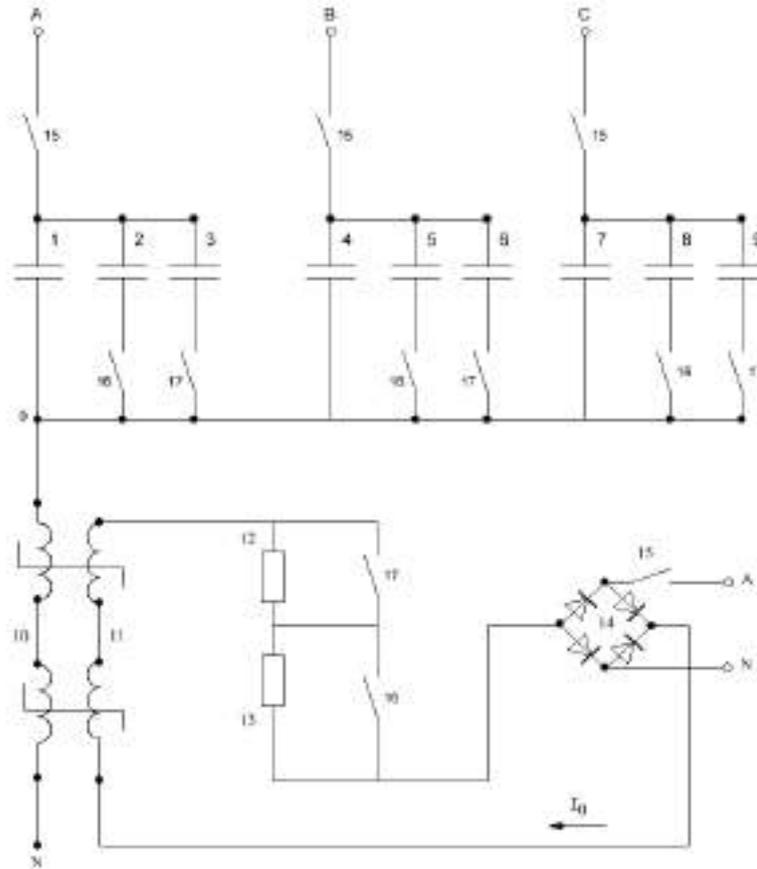


Рисунок 1.14 – Филтросимметрирующее устройство для трехфазной сети с нейтральным проводом [74]

Таким образом, ФСУ, включенное с помощью контактов 15 в трехфазную сеть 0,4 кВ с несимметричной нагрузкой, обладая малым сопротивлением нулевой последовательности (активным сопротивлением R_L рабочей обмотки МУ), будет шунтировать токи нулевой последовательности сети, снижения потери в линии и трансформаторе и повышая качество электрической энергии.

Недостатком филтросимметрирующего устройства является то, что активные потери постоянны и не зависят от уровня симметрирующей мощности.

Так же важным недостатком является необходимость ручного контроля реактивных токов и переключения контакторов [72].

Плавно регулируемые симметрирующие устройства. Широкое применение, для симметрирования однофазных нагрузок, нашли силовые управляемые вентили. С помощью данных устройств осуществляется фазовое и широтно-импульсное регулирование. Такими устройствами являются активные фильтры напряжения и тока [75].

Схемы активных фильтров напряжения и тока выполнены на базе инверторов напряжения с ШИМ [76]. Совместное использование активного фильтра напряжения и тока позволяет в значительной степени улучшить качество электрической энергии и устранить обратное влияние нелинейного потребителя на питающую сеть [72, 77].

Схема параллельно-последовательного соединения активных фильтров напряжения и тока представлена на рисунке 1.15, а на рисунке 1.16 представлено последовательно-параллельное соединение активных фильтров напряжения и тока.

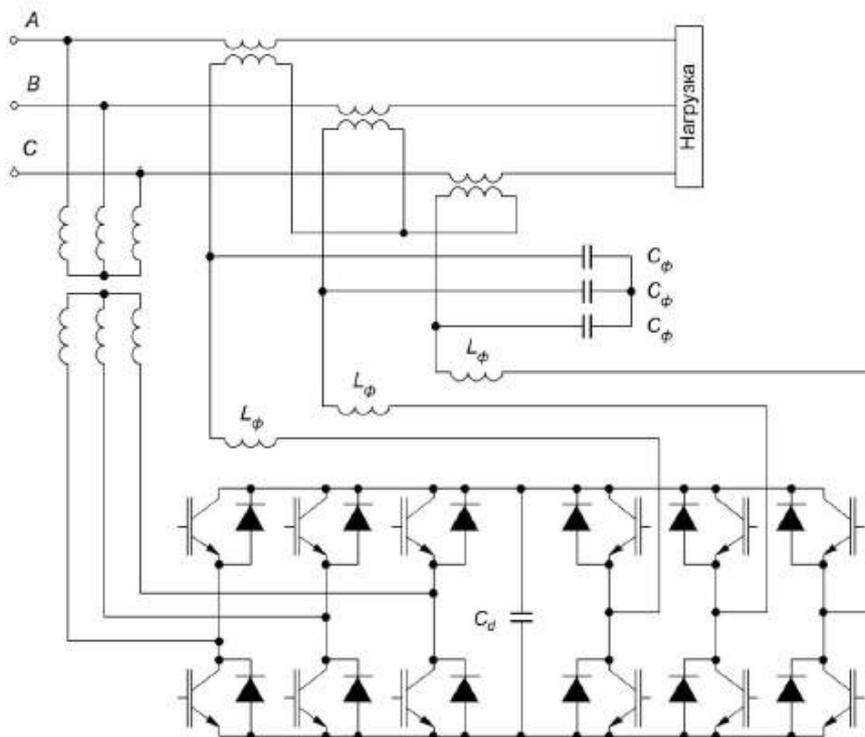


Рисунок 1.15 – Параллельно-последовательное соединение активных фильтров тока и напряжения [77]

Есть возможность объединить цепи постоянного напряжения общим конденсатором C_d за счет использования выходных трансформаторов в источниках компенсирующего искажения [72]. Данная схема так же может выполнять функцию регулирования реактивной мощности и стабилизировать напряжение при колебаниях мощности нагрузки, тогда последовательный фильтр напряжения выполняет еще функцию вольтодобавочного регулятора переменного напряжения [76]. Основным преимуществом данной схемы является то, что возможно исправление искаженной формы напряжения независимо от природы возникновения искажений [78].

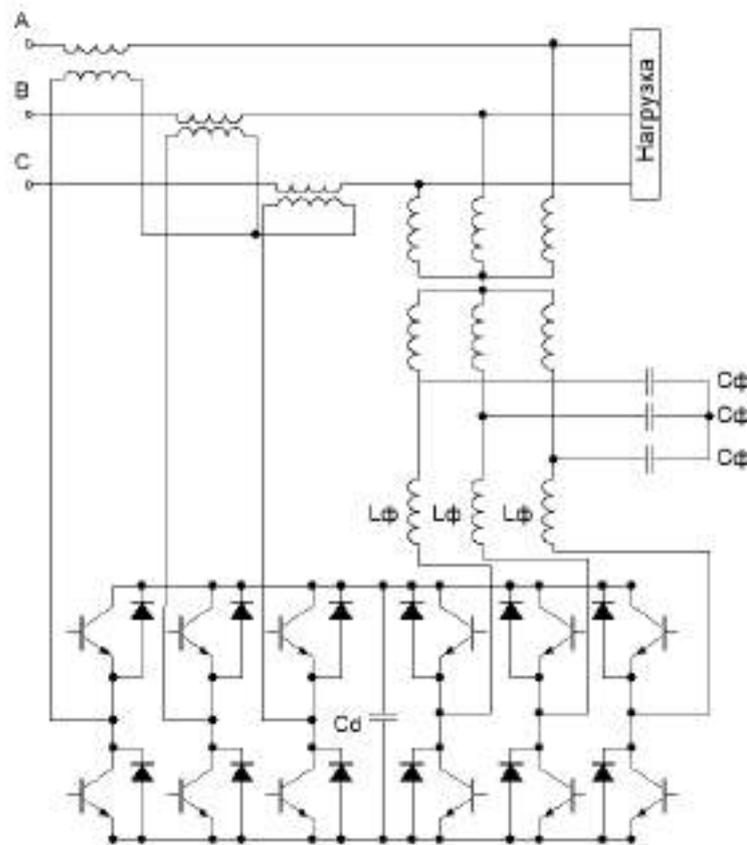


Рисунок 1.16 – Последовательно-параллельное соединение активных фильтров напряжения и тока [77]

Недостатком является то, что емкостный накопитель энергии в данных схемах чувствителен к высшим гармоникам, а также подвержен возникновению резонансных и феррорезонансных явлений, повышению напряжения на конденсаторе при индуктивности в линии. Кроме того, он не может прямо

исправлять токи нагрузки, подключенной за ним, влияет на них только посредством изменения напряжения [72].

Известен статический компенсатор реактивной мощности типа СТАТКОМ, который может работать в режиме симметрирования нагрузки [79]. Данное устройство подключается параллельно с сетью. Схема подключения приведена на рисунке 1.17. Устройство на базе СТАТКОМ состоит из трехфазного моста, собранного на шести полностью управляемых ключевых элементах (например, IGBT-транзисторах), конденсаторов на стороне постоянного тока моста и выходных дросселей на стороне переменного тока моста. Конденсатор выполняет функцию накопителя электроэнергии, значение которой определяет уровень напряжения на стороне постоянного тока. Выходные дроссели на стороне переменного тока моста служат для фильтрации модуляционных составляющих токов, возникающих в результате работы ШИМ, и одновременно обеспечивают их непрерывность [72]. В систему управления, реализуемую на микропроцессоре, поступают данные от датчиков, система вычисляет опорные сигналы в соответствии с режимом работы компенсатора и формирует импульсы управления ключами мостового преобразователя [80].

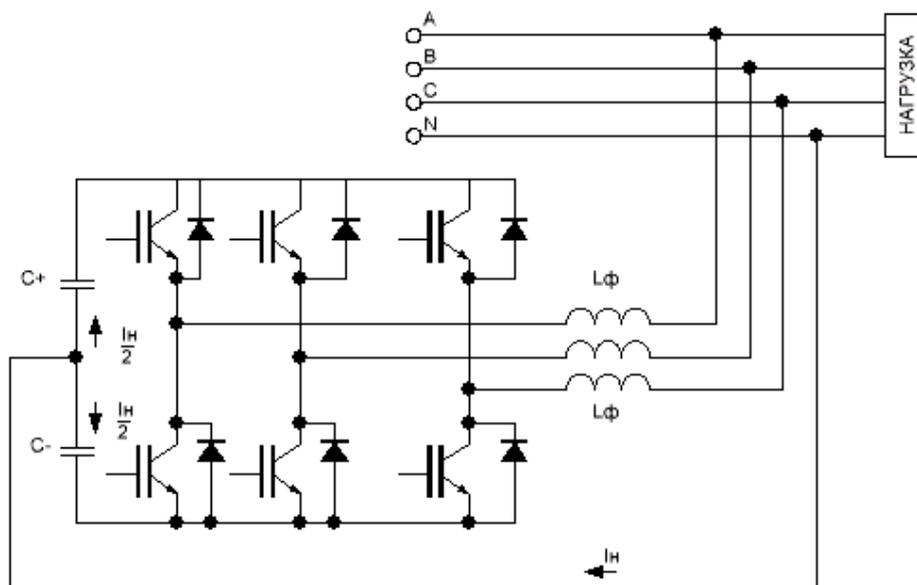


Рисунок 1.17 – Структурная схема статического компенсатора реактивной мощности [80]

Данное устройство компенсации несимметрии позволяет плавно регулировать в широком диапазоне несимметрию токов, устранять ток в нейтрали и вместе с тем компенсировать реактивную мощность. Недостатком устройства является сложная и дорогая его реализация.

Известно симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами (ПМ РФ № 61063 Н02J 3/26) [59]. На рисунке 1.18 показана структурная схема устройства.

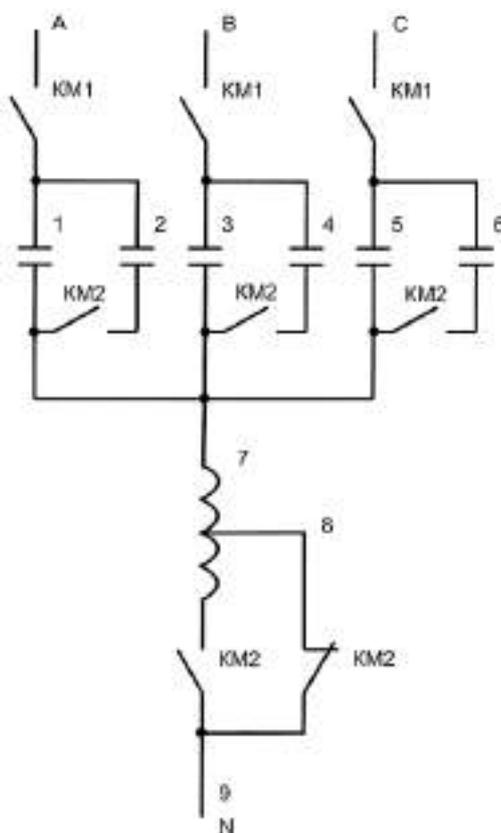


Рисунок 1.18 – Структурная схема симметрирующего устройства для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами [59]

Преимуществом данной полезной модели является то, что мощность устройства саморегулируется в функции тока нулевого провода. Параметры предлагаемого устройства отстраиваются от несимметрии токов и напряжений в сети 0,4 кВ, имеющей место в данный момент времени.

Недостатки: Значительное потребление электроэнергии и недолговечность катушки магнитного пускателя и ее контактов, и как следствие снижение надежности функционирования самого устройства.

Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами, содержит одну ступень мощности, включающую в себя емкостные элементы и индуктивность. Дополнительно содержит ступень мощности, включающую в себя емкостные элементы и полную индуктивность, а также схему автоматического управления, работающую в функции тока нулевого провода (рисунок 1.19) [59].

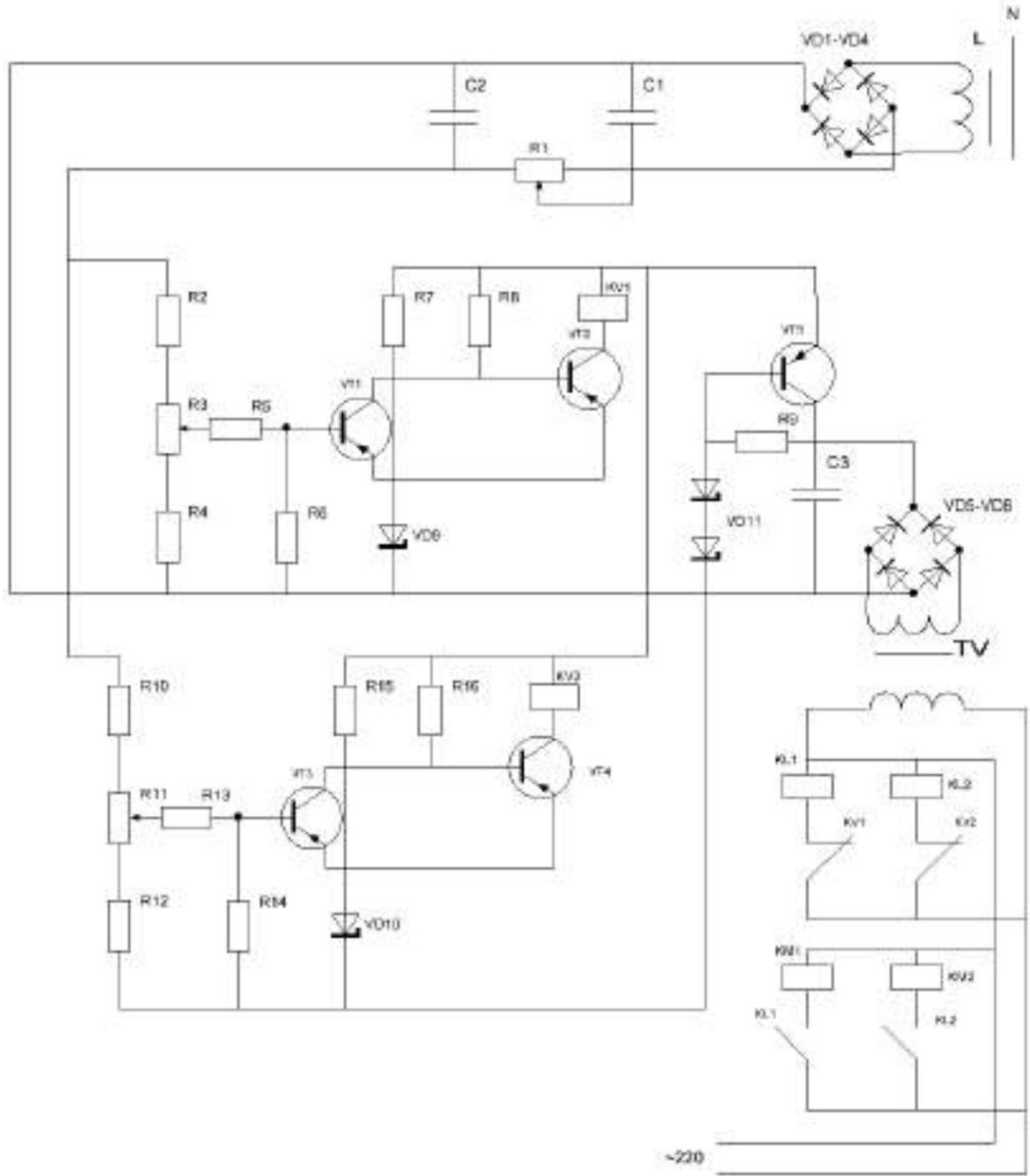


Рисунок 1.19 – Схема автоматического управления симметрирующим устройством для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами [59, 81]

Недостатками данного устройства являются:

1. Значительное потребление электроэнергии и недолговечность катушки магнитного пускателя и ее контактов, и как следствие снижение надежности функционирования самого устройства.

1.7 Выводы по главе и постановка задач исследования

1. Техническое состояние больше половины сельских сетей Нижегородской области является неудовлетворительным, отключения воздушных линий 0,4 и 10 кВ составляют от 40 до 90% от общего количества аварийных отключений, демонстрируя низкую надежность электроснабжения, вызывая огромные материальные потери сельхозпроизводителей и определенную социальную напряженность в сельскохозяйственных районах.

2. Более 35% [21] сельских потребителей имеют электроснабжение с нарушением качества поставляемой электроэнергии (ЭЭ) в плане несимметрии, несинусоидальности и отклонения напряжения. Ухудшение качества электроэнергии снижает уровень электромагнитной совместимости электрической сети энергосистемы и сети потребителей, ухудшает работу электроприемников, нарушает технологические процессы и наносит серьезный ущерб сельскохозяйственным предприятиям.

3. Потери электроэнергии при её передаче на уровне напряжения 0,4 кВ составляют 20 %, а на 10 кВ – 17 %, когда для технически развитых стран величина относительных потерь (даже в сельскохозяйственных сетевых компаниях) составляет не более 10%. Высокие потери влияют на рост стоимости электроэнергии (и себестоимость производимых товаров) и значительно снижают конкурентоспособность выпускаемой сельскохозяйственной и прочей продукции.

4. Сельские распределительные сети характеризуются значительной степенью несимметрии токов и напряжений, которые являются одной из причин потерь электрической энергии. Значительная несимметрия токов обусловлена

неравномерностью однофазных нагрузок по фазам сети и случайным характером их работы.

5. Снижение несимметрии и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ может быть достигнуто применением способов и технических средств, позволяющих уменьшить ток нулевой последовательности сети.

6. Анализ технических средств симметрирования напряжений показал, что существующие симметрирующие устройства, кроме указанных преимуществ, имеют ряд недостатков, среди которых высокий уровень дополнительных потерь электроэнергии, сложность и дороговизна реализации. Поэтому модернизация симметрирующих устройств является актуальной задачей для регулирования степени несимметрии в сети, снижения потерь энергии и стабилизации работы энергосистемы.

Целью работы является снижение несимметрии токов (напряжений) потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ за счёт разработки регулируемого симметрирующего устройства.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи исследования:

1. Выполнить анализ несимметрии токов (напряжений) и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ, существующих способов и средств их снижения.

2. Выполнить теоретическое обоснование применения регулируемого симметрирующего устройства для снижения несимметрии токов (напряжений) и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

3. Разработать новое регулируемое симметрирующее устройство, выполнить его имитационное моделирование и обосновать параметры.

4. Выполнить исследование экспериментального образца регулируемого симметрирующего устройства.

5. Выполнить технико-экономическую оценку применения регулируемого симметрирующего устройства в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ (НАПРЯЖЕНИЙ) И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 кВ

2.1 Разработка способа регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ

Так как несимметрия токов и напряжений носит случайный характер и изменяется во времени в значительных пределах, то симметрирование режимов работы распределительных сетей с постоянной мощностью СУ будет недостаточно эффективным [1]. В электрической сети 0,4 кВ симметрирующие устройства, как правило, выполняются с нерегулируемыми параметрами. При довольно больших значениях токов нулевой последовательности, мощность устройства может достигать значительной величины. В связи с этим токи прямой последовательности могут создавать дополнительные потери мощности и электрической энергии, что значительно снижает экономическую целесообразность использования симметрирующих устройств в течение всего времени суток. С целью повышения эффективности симметрирования предлагается СУ, позволяющее обеспечить автоматическое регулирование его мощности в зависимости от изменяющейся нагрузки [82].

При анализе литературных источников и постановке задач диссертационной работы было выявлено, что наиболее существенные недостатки уже существующих способов регулируемого симметрирования токов и напряжений – это высокий уровень дополнительных потерь электроэнергии, сложность и дороговизна реализации, а также то, что симметрирование проходит в соответствии с расчетным значением напряжения, а не по фактическому напряжению, что негативно сказывается на точности проведенного симметрирования напряжения. Известный способ [83, 84] автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции предусматривает

поддержание в норме напряжения за счет использования в качестве контролируемого параметра только линейных напряжений, то есть не учитывает значений фазных напряжений. В то же время именно однофазные потребители являются основными источниками несимметрии токов и напряжений. К тому же данный способ предусматривает использование датчиков напряжения, количество которых возрастает пропорционально сложности электрической сети, что ведет к увеличению капитальных вложений на реализацию способа.

Анализ способов осуществления регулируемого симметрирования напряжения также показал, что применяемые на сегодняшний день способы недостаточны и не могут в полной мере обеспечить точное, надежное регулирование и поддержание заданного напряжения у потребителей.

В связи с этим необходима разработка нового, высоконадежного способа регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ, который позволил бы не только повысить качество, но и снизить потери электрической энергии.

Данный способ должен обеспечивать возможность регулируемого симметрирования токов и напряжений за счет использования в качестве контролируемого параметра несимметрии фазных напряжений, также повышение точности симметрирования за счет расширения функциональных возможностей способа путем опроса данных по напряжению.

Суть предлагаемого изобретения поясняется рисунком 2.1, на котором представлена структурная схема, реализующая способ.

Схема состоит из: ДН1-ДН-3 — датчики фазного напряжения; БУ — блок управления; ЗУ — задающее устройство; БК — блок коммутации; БС — блок симметрирования [85].

В качестве устройства (БС), непосредственно осуществляющего регулирование напряжения, применяется симметрирующее устройство.

Разработанный способ предполагает установку датчиков фазного напряжения (ДН) в ближайшем к источнику питания узле нагрузок [12].

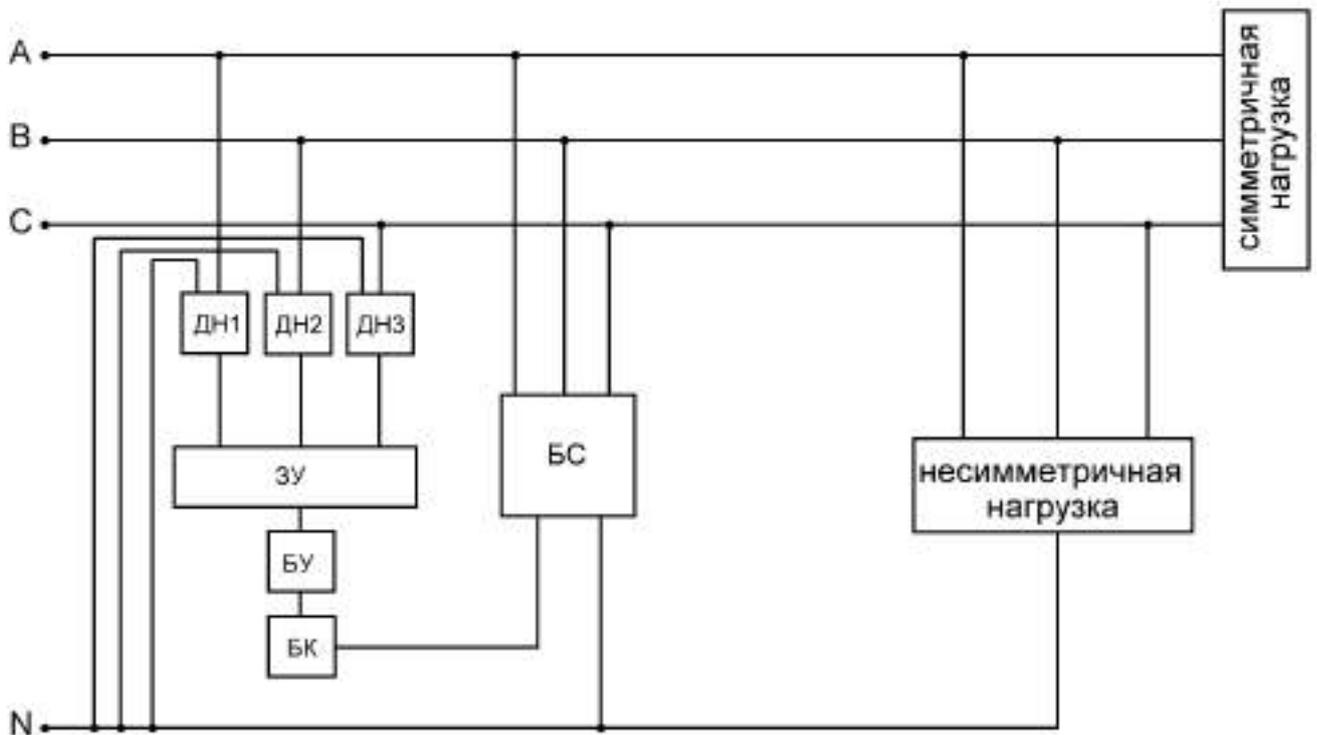


Рисунок 2.1 - Способ регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ

Работа регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ обеспечивается следующим образом.

С помощью датчиков фазных напряжений ДН1-ДН3 осуществляется автоматизированный сбор динамических данных по напряжению. С помощью задающего устройства ЗУ задаются диапазоны отклонения напряжений соответствующие уровням симметрирования. Собранные данные датчиков фазных напряжений ДН1-ДН3 и задающего устройства ЗУ анализируются блоком управления БУ на наличие отклонения напряжения от номинальных значений. Полученное отклонение напряжения обрабатывается БУ и поступает на блок коммутации БК, которое воздействует на блок симметрирования БС.

Таким образом, происходит симметрирование токов и напряжений в сети 0,4 кВ, поддержание в норме основных параметров качества и снижения потерь электрической энергии за счет использования в качестве управляющего параметра несимметрии фазных напряжений [85].

При разработке способа необходимо разработать алгоритм, при котором симметрирующее устройство будет распознавать величину отклонения фазного

напряжения, сравнивать эти значения с заданными, и на основе сравнения формировать управляющий сигнал и подавать его на исполнительное устройство [83].

Номинальные значения напряжений в сетях низкого напряжения регламентируется ГОСТ 29322-2014 «Напряжения стандартные» [86]. Согласно данному документу в трехфазных четырехпроводных и трехпроводных сетях переменного тока частотой 50 Гц номинальное фазное напряжение должно составлять 230 В, а номинальное линейное – 400 В. Система 230/400 В является результатом развития системы 220/380 В. Подобное повышение напряжения повышает пропускную способность низковольтных сетей при неизменном сечении жил питающих кабелей. Все выпускаемое на данный момент оборудование должно рассчитываться на указанную систему напряжений. Однако до сих пор используется оборудование с номинальным фазным напряжением 220 В. В технических требованиях к такому оборудованию, обычно опирающихся на стандарты качества электроэнергии, допустимые отклонения уровня напряжения отсчитываются именно от данного напряжения, и если нижний уровень при номинальном 230 В по ГОСТ 32144-2013 будет составлять 207 В, что укладывается в диапазон $\pm 10\%$ от номинального 220 В, то верхний уровень будет составлять 253 В, что выходит за пределы диапазона $\pm 10\%$ от напряжения 220 В [21]. Поэтому при разработке способа регулируемого симметрирования токов и напряжений в сети 0,4 кВ используется номинальное напряжение 220 В.

Большое количество работ направлено на анализ режимов работы действующих сетей 0,4 кВ. Из анализа имеющихся данных [83] по максимальным установившимся значениям отклонения напряжения можно сделать вывод, что наибольшее число таких отклонений приходится на диапазон напряжений $\pm 5\% \dots \pm 8\%$, на диапазон $\pm 8\% \dots \pm 10\%$ и так же отклонения напряжение наблюдаются и выше 10% .

Исследованиями таких ученых как Попов Н.М., Перова М.Б. и многих других доказано, что отклонение напряжения более 5% приводит к перерасходу электрической энергии, а также влечет к большому ежегодному материальному ущербу. Так, на каждый процент изменения питающего напряжения потребляемая

реактивная и активная мощность ламп накаливания увеличивается в среднем на 1,5 и 3%, при этом снижая их срок службы [83, 87, 88].

Поэтому способ регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ заключается в том, что параметры устройства необходимо изменять от уровня несимметрии токов и напряжений в сети 0,4 кВ, имеющей место в данный момент времени, т.е. необходимо, чтобы мощность устройства автоматически регулировалась в функции уровня несимметрии фазных напряжений.

Для эффективного снижения потерь электрической энергии и поддержания значений напряжений соответствию ГОСТ [28] при использовании симметрирующего устройства, при разработке регулируемого способа симметрирования необходимо учитывать отклонения напряжений только в меньшую сторону от номинального напряжения, так как симметрирующие устройства являются средством повышения уровня напряжений и регулирование напряжений при отклонении свыше +10% от значения ГОСТ приведет еще к большему увеличению отклонения.

Начало алгоритма предусматривает инициализацию начальных параметров. Блок 3 выполняет измерения напряжения $UA(B,C)$ и определение отклонения напряжения. Блок 4 выполняет сравнение отклонения фазных напряжений с номинальным значением. При отклонении хотя бы одного фазного напряжения от номинального в диапазоне $\delta UA(B,C) \geq -5\%$, сигнал поступает на блок 5 и включается 1 ступень симметрирования. В том случае, если условие блока 4 не выполняется, то цикл возвращается к блоку 3 для проведения повторных измерений. Включение РСУ и переключение ступеней выполняется с задержкой времени и t выдержки, которое соответствует времени переходного процесса, установленное блоками 6, 12, 14, 20, 24, 26, 32, 36 и 40. Блок 7 выполняет измерения напряжения $UA(B,C)$ и определение отклонения напряжения. Блоком 8 выполняется сравнение отклонения фазных напряжений с номинальным значением. При отклонении хотя бы одного фазного напряжения от номинального

в диапазоне $\delta UA(B, C) \geq -5\%$, сигнал поступает на блок 13 и включается 2 степень симметрирования.

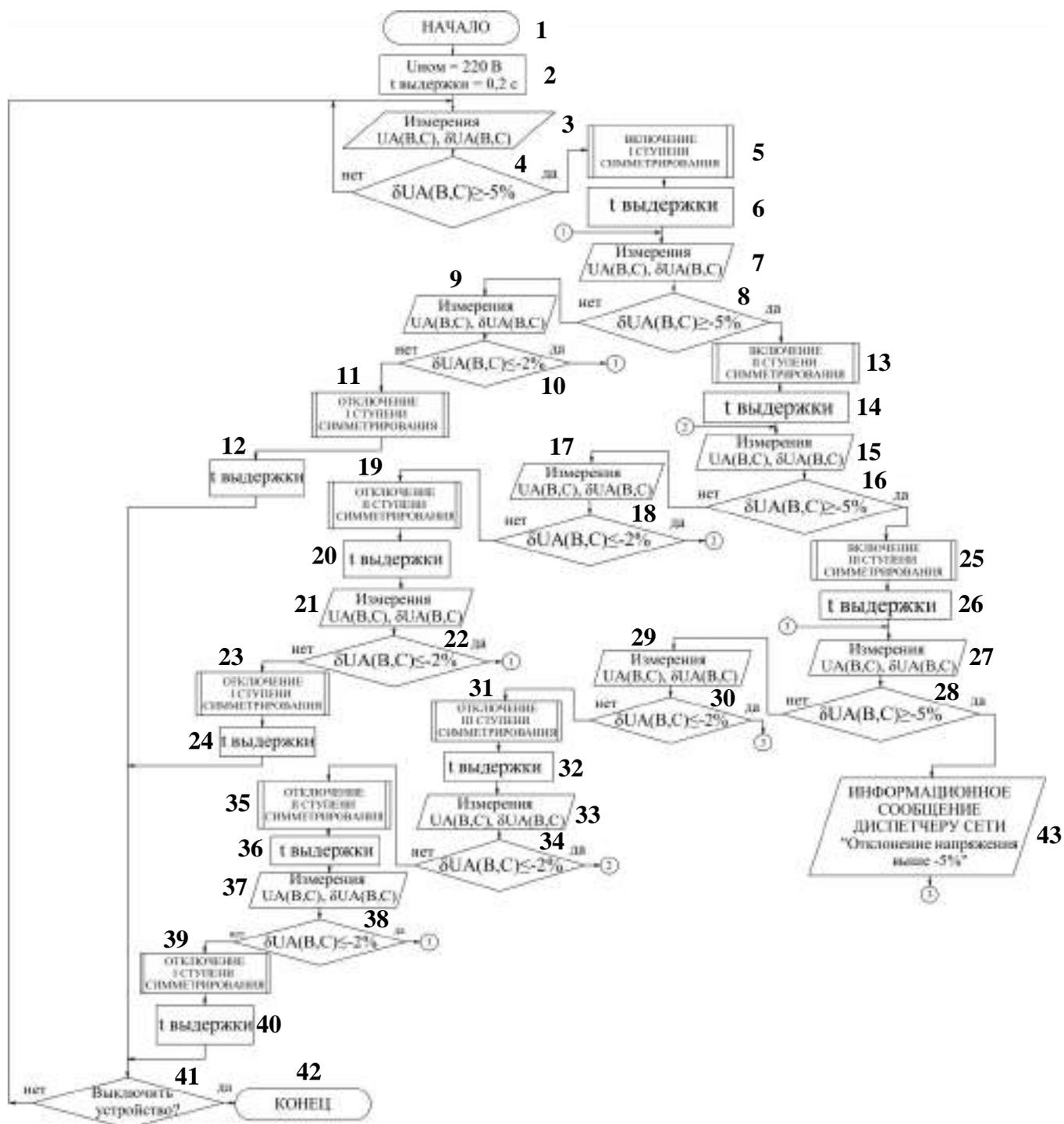


Рисунок 2.2 – Алгоритм регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ с применением критериев, для переключения ступеней симметрирования

Если условие блока 8 не выполняется, то блок 9 выполняет измерения напряжения $UA(B, C)$ и определение отклонения напряжения. В таком случае 1

ступень продолжает работать до тех пор, пока не выполняется условие блока 10 $\delta UA(B, C) \leq -2\%$, при выполнении условия начнется новая проверка блоком 8. Если условие блока 10 не выполняется, то происходит отключение 1 ступени и цикл возвращается к блоку 3 для новой проверки. Блоком 16 выполняется сравнение отклонения фазных напряжений с номинальным значением. При отклонении хотя бы одного фазного напряжения от номинального в диапазоне $\delta UA(B, C) \geq -5\%$, сигнал поступает на блок 25 и включается 3 ступень симметрирования. Если условие блока 16 не выполняется, то 2 ступень продолжает работать до тех пор, пока будет выполняться условие блока 18 $\delta UA(B, C) \leq -2\%$ и проверка блоком 15. Если условие блока 18 не выполняется, то происходит отключение 2 ступени и сравнение отклонения напряжения с условием блока 22. Если условие блока 22 не выполняется, то происходит отключение 1 ступени, а затем цикл возвращается к блоку 3 для новой проверки. При выполнении условия блока 23 подается сигнал на начало блока 7 для нового измерения. Блоком 28 выполняется сравнение отклонения фазных напряжений с номинальным значением. При отклонении хотя бы одного фазного напряжения от номинального в диапазоне $\delta UA(B, C) \geq -5\%$ блоком 43 отправляется информационное сообщение диспетчеру сети «Отклонение напряжения выше -5% », тем самым информирует о невозможности устранения несимметрии в данный момент времени и возвращается к блоку 27 для новой проверки. Если условие блока 28 не выполняется, то 3 ступень симметрирования находится в рабочем состоянии, до тех пор, пока будет выполняться условие блока 30. Если условие блока 30 не выполняется, то 3 ступень отключается, затем блоком 34 определяется, нужно ли отключать 2 ступень, если нет, то выполняется измерения блоком 15 и проверка блоком 16. После отключения 2 ступени симметрирования блоком 38 выполняется сравнение отклонения напряжений в заданном условии $\delta UA(B, C) \leq -2\%$, если условие выполняется, то цикл возвращается на начало блока 7 для новой проверки, при не выполнении условия, 1 ступень симметрирования отключается. Если не требуется ручное отключение РСУ, то алгоритм начинается заново [89].

Таким образом, данный алгоритм позволяет автоматически определять отклонения напряжений для каждой из фаз и так же автоматически определять необходимую ступень симметрирования для включения [89].

2.2 Математическое моделирование электрической сети 0,4 кВ с регулируемым симметрированием.

Место установки регулируемого симметрирующего устройства в распределительной сети 0,4 кВ имеет первостепенное значение. Рядом авторов называются шины трансформатора распределительной ТП, как наиболее целесообразное место установки СУ в сети 0,4 кВ. Вместе с этим проведенные исследования [88, 90] показали, что включение СУ на шинах трансформатора несколько улучшает качественный состав напряжения в узле нагрузок и на шинах трансформатора, но вместе с этим приводит к увеличению потерь электрической энергии. Включение симметрирующего устройства в узле нагрузок приводит как к снижению потерь мощности и электрической энергии, так и к снижению коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений. Следовательно, наибольший эффект симметрирования режима работы сети 0,4 кВ достигается установки СУ в узле нагрузок [11]. Поэтому здесь и в дальнейшем будем рассматривать именно этот вариант расположения СУ.

Рассмотрим электрическую сеть с сосредоточенной нагрузкой (рисунок 2.3).

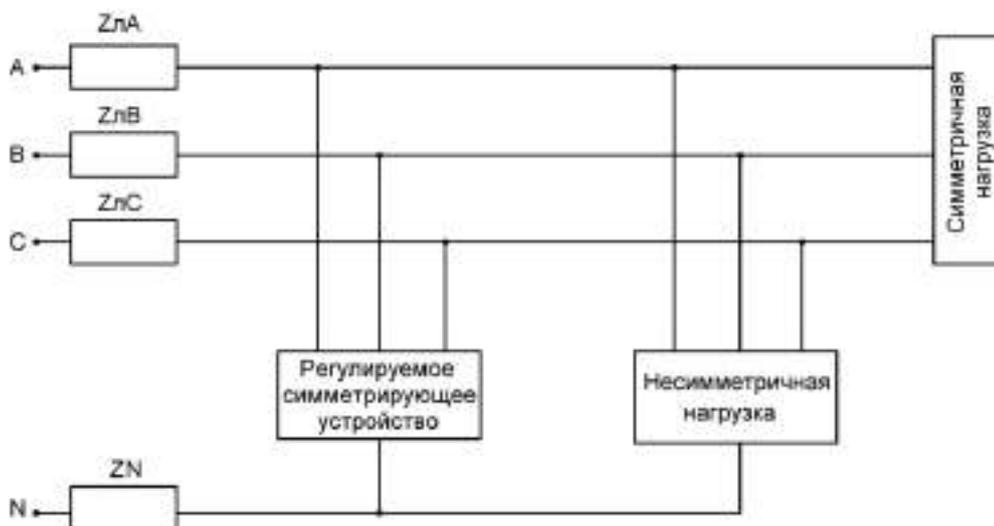


Рисунок 2.3 – Схема участка электрической сети 0,4 кВ с сосредоточенной нагрузкой

При выводе аналитических выражений показателей несимметрии токов и напряжений примем следующие допущения:

1. Система напряжений на шинах 0,4 кВ трансформатора симметрична и не зависит от нагрузки сети.

2. Все элементы сети, то есть трансформаторы, симметрирующее устройство, провода имеют линейные параметры (потерями холостого хода в трансформаторе пренебрегаем).

3. Трёхфазная симметричная нагрузка и симметрирующее устройство имеют статический характер, то есть комплексные сопротивления и проводимости прямой и обратной последовательности равны между собой [11].

Схема замещения с учетом принятых допущений изображена на рисунке 2.4.

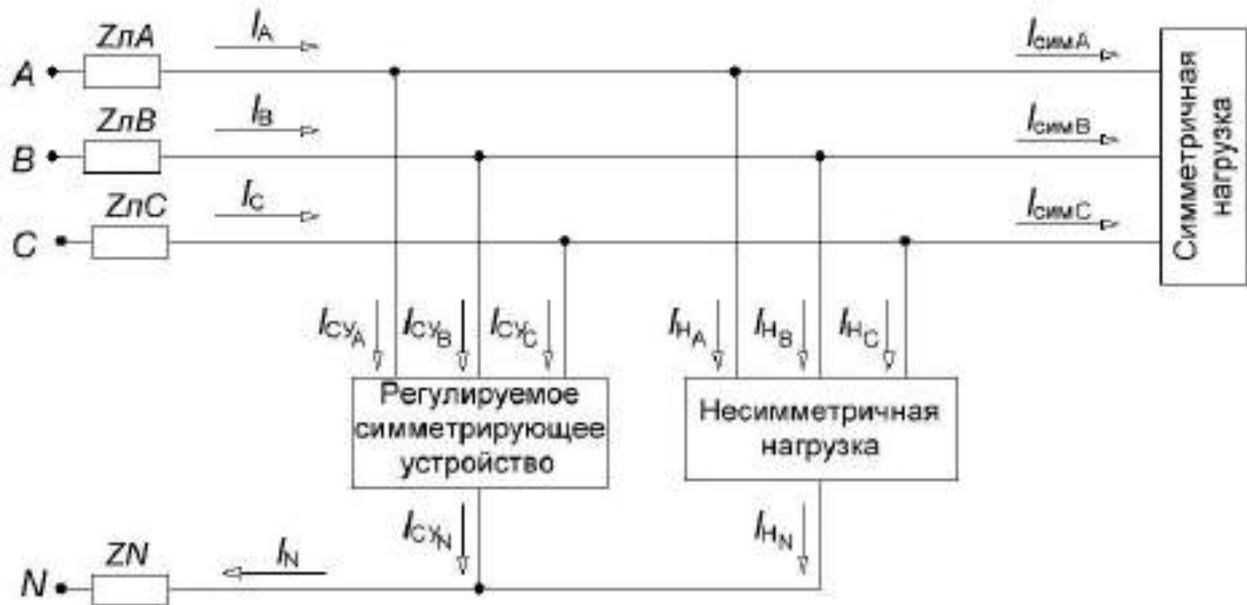


Рисунок 2.4 – Схема замещения участка исследуемой сети 0,4 кВ

При наличии нейтрального провода в схеме трансформатора $Y/Y0-0$ сумма фазных токов во вторичной обмотке не равна нулю. Поэтому во вторичной обмотке могут протекать токи не только прямой и обратной, но и нулевой последовательности. В первичной цепи токи нулевой последовательности протекать не могут. В этом режиме уже необходимо использовать метод симметричных составляющих [91].

На рисунке 2.5 приведены три независимые схемы для расчета прямой, обратной и нулевой последовательности токов и напряжений методом симметричных составляющих, заменив несимметричную нагрузку в каждой фазе источником ЭДС. Напряжения \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C этих источников ЭДС должны быть равны напряжениям на нагрузке в соответствующих фазах. Далее разложим эти напряжения на неизвестные нам пока симметричные составляющие \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_0 , значения которых определим в процессе расчета [91].

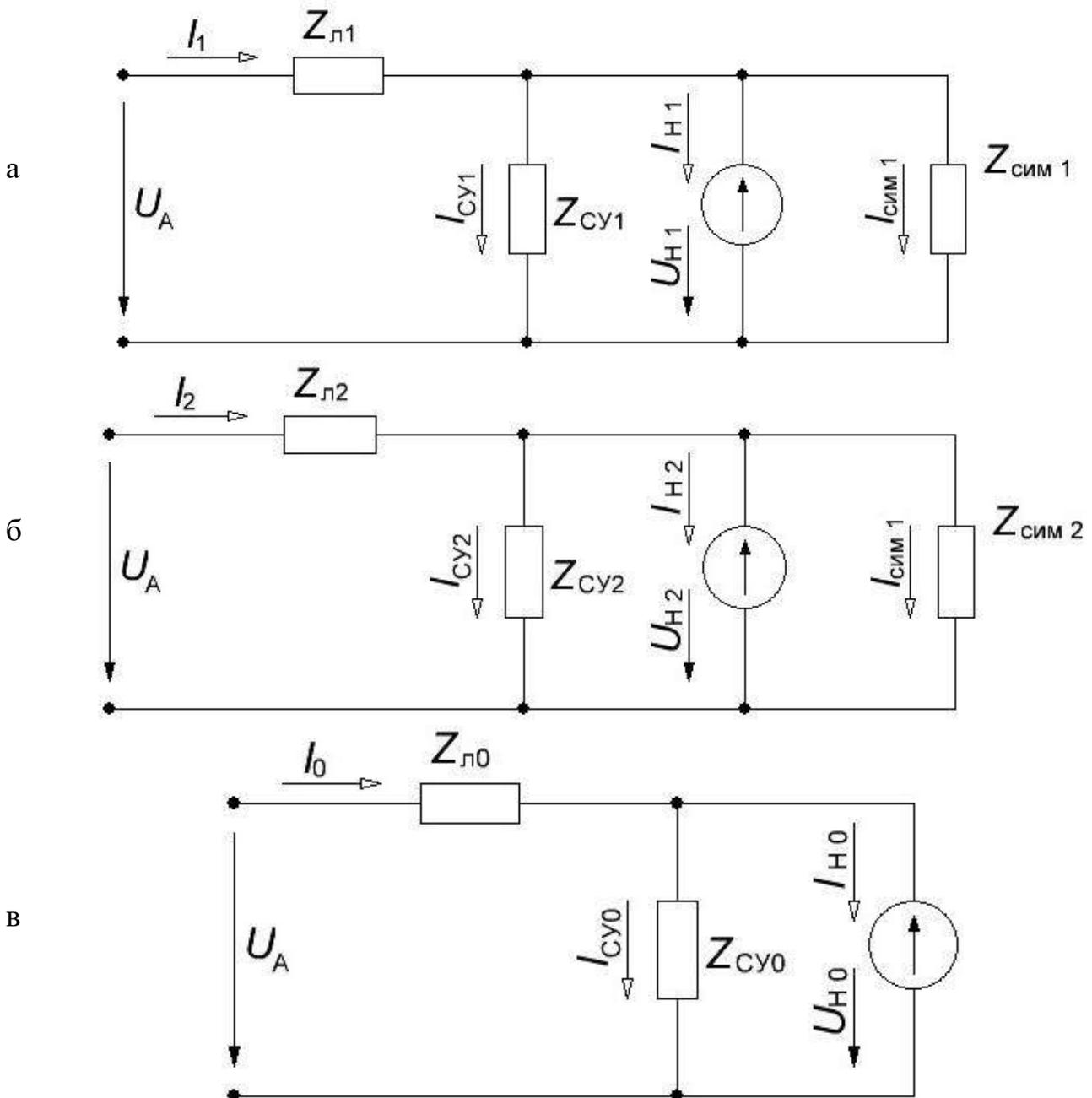


Рисунок 2.5 – Расчетные схемы исследуемой сети для фазы А:
а – прямой, б – обратной, в – нулевой последовательности

Для схемы 2.5 а составим одно уравнение по первому закону Кирхгофа и три уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$i_1 - i_{cy1} - i_{H1} - i_{сим1} = 0 \quad (2.1)$$

$$i_1 \underline{Z}_{Л1} + i_{cy1} \underline{Z}_{cy1} = \dot{U}_A \quad (2.2)$$

$$i_1 \underline{Z}_{Л1} + \dot{U}_{H1} = \dot{U}_A \quad (2.3)$$

$$i_1 \underline{Z}_{Л1} + i_{сим1} \underline{Z}_{сим1} = \dot{U}_A \quad (2.4)$$

Подобные уравнения составим для схемы 2.5б:

$$i_2 - i_{cy2} - i_{H2} - i_{сим2} = 0 \quad (2.5)$$

$$i_2 \underline{Z}_{Л2} + i_{cy2} \underline{Z}_{cy2} = \dot{U}_A \quad (2.6)$$

$$i_2 \underline{Z}_{Л2} + \dot{U}_{H2} = \dot{U}_A \quad (2.7)$$

$$i_2 \underline{Z}_{Л2} + i_{сим2} \underline{Z}_{сим2} = \dot{U}_A \quad (2.8)$$

Для схемы на рисунке 2.5 в уравнения примут вид:

$$i_0 - i_{cy0} - i_{H0} = 0 \quad (2.9)$$

$$i_0 \underline{Z}_{Л0} + i_{cy0} \underline{Z}_{cy0} = \dot{U}_A \quad (2.10)$$

$$i_0 \underline{Z}_{Л0} + \dot{U}_{H0} = \dot{U}_A \quad (2.11)$$

Запишем уравнения 2.1 – 2.11 в матричной форме:

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_1 & 0 \\
 \underline{Z}_{Л1} & \underline{Z}_{cy1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_{cy1} & \dot{U}_A \\
 \underline{Z}_{Л1} & 0 & \dot{U}_{H1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_{H1} & \dot{U}_A \\
 \underline{Z}_{Л1} & 0 & 0 & \underline{Z}_{сим1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_{сим1} & \dot{U}_A \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & i_2 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{Л2} & \underline{Z}_{cy2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_{cy2} & \dot{U}_A \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{Л2} & 0 & \dot{U}_{H2} & 0 & 0 & 0 & 0 & i_{H2} & \dot{U}_A \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{Л2} & 0 & 0 & \underline{Z}_{сим2} & 0 & 0 & 0 & i_{сим2} & \dot{U}_A \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & i_0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{Л0} & \underline{Z}_{cy0} & 0 & i_{cy0} & \dot{U}_A \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{Л0} & 0 & \dot{U}_{H0} & i_{H0} & \dot{U}_A
 \end{array} \quad (2.12)$$

Систему уравнений (2.12) решаем методом Крамера в интегрированном пакете MathCad (рисунок 2.6), тогда решение примет вид:

$$\mathbf{A} := \begin{pmatrix}
 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \underline{Z}_{\text{Л1}} & \underline{Z}_{\text{СВ1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \underline{Z}_{\text{Л1}} & 0 & \dot{U}_{\text{Н1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \underline{Z}_{\text{Л1}} & 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{СИМ1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{Л2}} & \underline{Z}_{\text{СВ2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{Л2}} & 0 & \dot{U}_{\text{Н2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{Л2}} & 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{СИМ2}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{Л0}} & \underline{Z}_{\text{СВ0}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{Л0}} & 0 & U_{\text{Н0}}
 \end{pmatrix}
 \mathbf{X} := \begin{pmatrix}
 \dot{I}_1 \\
 \dot{I}_{\text{СВ1}} \\
 \dot{I}_{\text{Н1}} \\
 \dot{I}_{\text{СИМ1}} \\
 \dot{I}_2 \\
 \dot{I}_{\text{СВ2}} \\
 \dot{I}_{\text{Н2}} \\
 \dot{I}_{\text{СИМ2}} \\
 \dot{I}_0 \\
 \dot{I}_{\text{СВ0}} \\
 \dot{I}_{\text{Н0}}
 \end{pmatrix}
 \mathbf{B} := \begin{pmatrix}
 0 \\
 \dot{U}_A \\
 \dot{U}_A \\
 \dot{U}_A \\
 0 \\
 \dot{U}_A \\
 \dot{U}_A \\
 \dot{U}_A \\
 0 \\
 \dot{U}_A \\
 \dot{U}_A
 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{X} := \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}$$

Рисунок 2.6 – Программа расчета системы уравнений
в интегрированном пакете MathCad

Те же системы уравнений составим для фаз B и C . В результате получим значения токов прямой \dot{I}_1 , обратной \dot{I}_2 и нулевой последовательностей \dot{I}_0 [9].

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C); \\
 \dot{I}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C); \\
 \dot{I}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C).
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Для определения коэффициентов токов по обратной K_{2i} и нулевой K_{0i} последовательностям воспользуемся выражениями [31]:

$$K_{2i} = \dot{I}_2 / \dot{I}_1; \quad K_{0i} = \dot{I}_0 / \dot{I}_1.
 \tag{2.14}$$

Определим коэффициент дополнительных потерь от несимметрии токов и напряжений в сети 0,4 кВ. Для участка трёхфазной линии с нейтральным проводом K_p может быть записан в следующем виде [10]:

$$K_p = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot r_N}{r_\Phi}\right),
 \tag{2.15}$$

где r_N – активное сопротивление нулевого провода, Ом;

r_Φ – активное сопротивление фазного провода, Ом.

Расчёт показателей несимметрии напряжений.

Как известно, несимметричная система фазных напряжений

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{U}_A \cdot e^{j\varphi_A}, \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_B \cdot e^{j\varphi_B}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_C \cdot e^{j\varphi_C}\end{aligned}\quad (2.16)$$

может быть разложена на симметричные составляющие прямой U_1 , обратной U_2 и нулевой U_0 последовательностей [11]:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a \cdot \dot{U}_B + a^2 \cdot \dot{U}_C) \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2 \cdot \dot{U}_B + a \cdot \dot{U}_C) \\ \dot{U}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)\end{aligned}\quad (2.17)$$

Определив U_1 , U_2 , U_0 , можно найти коэффициенты обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательностей напряжений:

$$K_{2U} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}; K_{0U} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1}\quad (2.18)$$

Расчет отклонения напряжения

Отклонение напряжения, в блоках 3, 7, 9, 15, 17, 21, 27, 29, 33, 37 алгоритма регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ с применением критериев, для переключения ступеней симметрирования (рисунок 2.2), в процентах определится:

$$\delta U_{A(B,C)} = \frac{U_{A(B,C)} - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

где $U_{A(B,C)}$ – фазные напряжения;

$U_{НОМ}$ – номинальное напряжение сети, 220 В.

2.3 Определение параметров симметрирующего устройства

Наиболее эффективными и легко реализуемыми в современных условиях для сельских распределительных сетей 0,4 кВ являются симметрирующие устройства емкостно-индуктивного и индуктивно-ёмкостного типа [92].

В настоящее время известно много СУ с параллельным соединением конденсаторов [11, 74], однако данные устройства обладают рядом недостатков, указанных ранее.

Устройство [11] состоит из трёх конденсаторных батарей равной мощности с сопротивлением X_C и одного индуктивного элемента с сопротивлением X_L , которые соединены между собой по схеме четырёхлучевой звезды

Симметрирующие устройства такого типа оказывают симметрирующий эффект только при наличии в нём резонанса напряжений нулевой последовательности, при котором сопротивление протеканию токов нулевой последовательности будет определяться только активным сопротивлением катушек индуктивности, в то время как на напряжении прямой последовательности резонанс не возникает и для тока прямой последовательности имеет место значительное реактивное сопротивление [14].

Помимо эффекта симметрирования осуществляет компенсацию реактивной мощности токов прямой последовательности.

СУ емкостно-индуктивного и индуктивно-емкостного типа получили название шунто-симметрирующие устройства (ШСУ). Они имеют низкое сопротивление токам нулевой последовательности, поэтому данные устройства замыкают (шунтируют) на себе токи нулевой последовательности и не пропускают их на другие участки линии 0,4 кВ. Величина сопротивления нулевой последовательности таких устройств определяется активным сопротивлением катушек индуктивности. ШСУ подключаются параллельно электроприемникам и устанавливаются в начале или в конце линии электропередач [93].

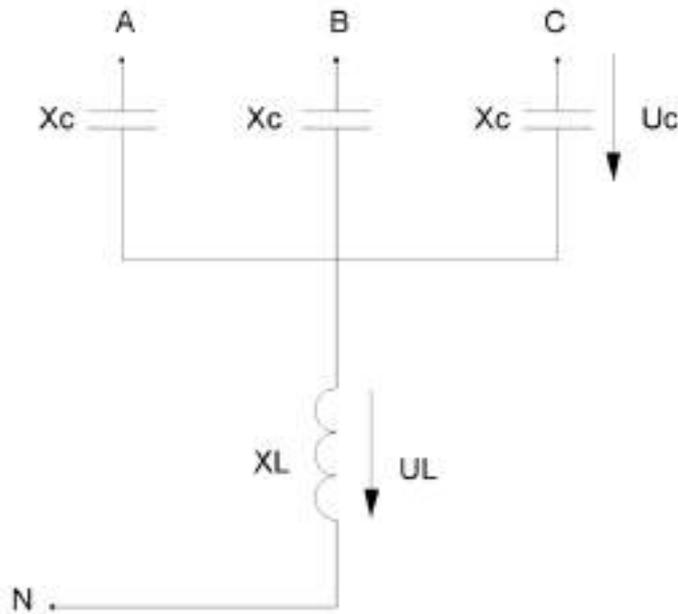


Рисунок 2.7 – Схема конденсаторного симметрирующего устройства [11]

Схема конденсаторного симметрирующего устройства приведена на рисунке 2.7, а его расчетная схема нулевой последовательности для фазы А – на рисунке 2.8.

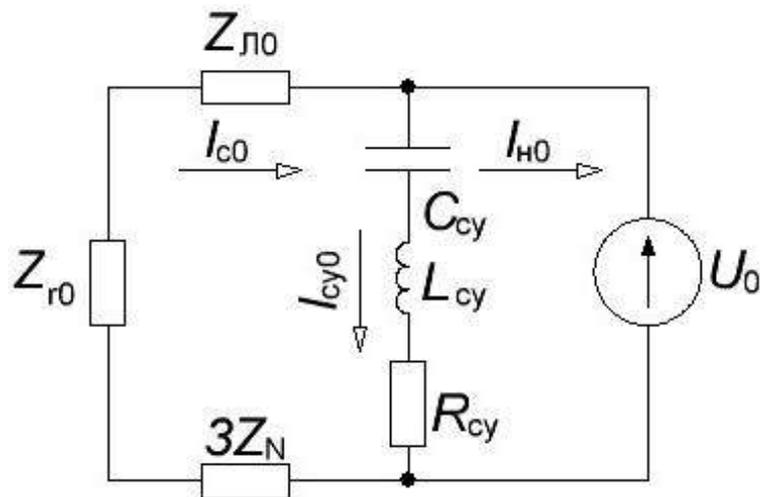


Рисунок 2.8 – Схема нулевой последовательности СУ

В соответствии со схемой (рисунок 2.8) сопротивление нулевой последовательности устройства [94]:

$$Z_{cy0} = 3 \cdot R_L + j(3 \cdot X_L - X_C), \quad (2.20)$$

где R_L – активное сопротивление индуктивности, Ом;

X_L – сопротивление катушки индуктивности, Ом;

X_C – сопротивление конденсаторной батареи, Ом.

Очевидно, что минимальная величина Z_{CY0} будет при условии резонанса напряжений, т. е. [94].

$$3 \cdot X_L = X_C \quad (2.21)$$

Сопротивления нулевой последовательности СУ будут минимальны и определяются практически активным сопротивлением катушек индуктивности, т.е. равна утроенному значению активного сопротивления индуктивного элемента:

$$Z_{CY0} = 3 \cdot R_L \quad (2.22)$$

Выразив величину сопротивления индуктивного элемента через его добротность (q_{CY}), получим:

$$X_L = q_{CY} \cdot R_L \quad (2.23)$$

Тогда емкостное сопротивление устройства, в соответствии с (2.21– 2.23):

$$X_C = 3 \cdot q_{CY} \cdot R_L \quad (2.24)$$

Следовательно, входное сопротивление прямой последовательности устройства является чисто емкостным и равно:

$$Z_{CY1} = -jX_C = -3 \cdot j \cdot q_{CY} \cdot R_L, \quad (2.25)$$

Определим мощность данного устройства. Для этого воспользуемся выражением:

$$S_{CY} = 3 \cdot (\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_{CY1} + \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_{CY2} + \dot{U}_0 \cdot \dot{I}_{CY0}) \quad (2.26)$$

где \dot{I}_{CY1} , \dot{I}_{CY2} , \dot{I}_{CY0} – сопряженные комплексы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей СУ.

Важным вопросом при расчете СУ является выбор величины емкости конденсаторной установки. При наличии в узле нагрузок электроприемников, имеющих индуктивный характер (электродвигатели) емкость СУ выбирается исходя из выражения (2.20), т. е:

$$C_{CY} = 3 \cdot q_{CY} \cdot R_L \cdot \omega, \quad (2.27)$$

где ω – угловая частота;

C_{CY} – емкость СУ, мкФ.

При активной нагрузке емкость C_{CY} может быть выбрана минимальной, но при этом индуктивность L_{CY} окажется значительной, т. е. катушка индуктивности будет иметь большое число витков, а значит, ее активное сопротивление R_L будет большим, что недопустимо с точки зрения величины Z_{CY0} . Поэтому при активной нагрузке следует выбрать минимальную емкость конденсаторной установки СУ [94].

2.4 Разработка программы для расчета потерь электрической энергии электрической сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством

Одной из целей, поставленной в данной работе, является, определение величины потерь энергии при её передаче по ЛЭП с несимметричным распределением токов по фазам по сравнению с режимом работы той же сети при наличии симметрирующего устройства.

Для определения величины потерь при несимметрии токов и напряжений в сети 0,4 кВ составим схему замещения участка линии с несимметричной нагрузкой и симметрирующим устройством (рисунок 2.9).

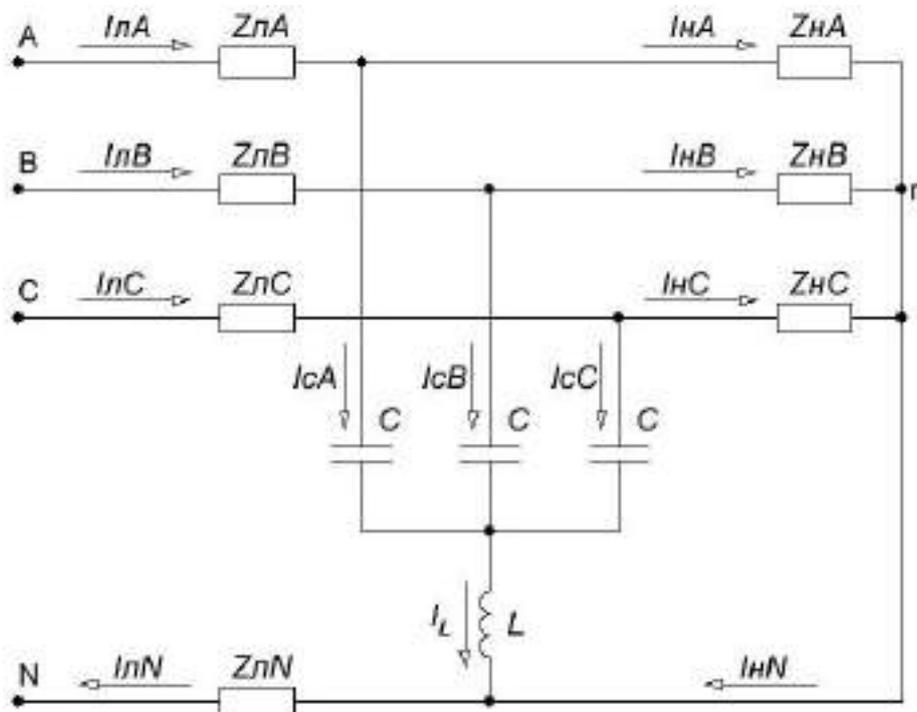


Рисунок 2.9 – Схема замещения участка цепи 0,4 кВ с несимметричной нагрузкой и симметрирующим устройством

Для рассматриваемой схемы решим систему уравнений, составленную по I и II законам Кирхгофа для узлов и контуров цепи (2.28):

$$\begin{aligned}
 i_{ЛА} - i_{НА} - i_{СА} &= 0 \\
 i_{ЛВ} - i_{НВ} - i_{СВ} &= 0 \\
 i_{ЛС} - i_{НС} - i_{СС} &= 0 \\
 i_{НА} + i_{НВ} + i_{НС} - i_L - i_N &= 0 \\
 i_{СА} + i_{СВ} + i_{СС} - i_L &= 0 \\
 i_{ЛА} \cdot \underline{Z}_{ЛА} + i_{НА} \cdot \underline{Z}_{ЛА} + i_N \cdot \underline{Z}_N &= \dot{U}_A \\
 i_{ЛВ} \cdot \underline{Z}_{ЛВ} + i_{НВ} \cdot \underline{Z}_{ЛВ} + i_N \cdot \underline{Z}_N &= \dot{U}_B \\
 i_{ЛС} \cdot \underline{Z}_{ЛС} + i_{НС} \cdot \underline{Z}_{ЛС} + i_N \cdot \underline{Z}_N &= \dot{U}_{AC} \\
 i_{ЛА} \cdot \underline{Z}_{ЛА} - j i_{СА} \cdot X_c + j i_L \cdot X_L + i_N \cdot \underline{Z}_N &= \dot{U}_A \\
 i_{ЛВ} \cdot \underline{Z}_{ЛВ} - j i_{СВ} \cdot X_c + j i_L \cdot X_L + i_N \cdot \underline{Z}_N &= \dot{U}_B \\
 i_{ЛС} \cdot \underline{Z}_{ЛС} - j i_{СС} \cdot X_c + j i_L \cdot X_L + i_N \cdot \underline{Z}_N &= \dot{U}_{AC}
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Преобразуем данную систему в матричную форму (2.29) и решим ее в интегрированном пакете MathCad (рисунок 2.10):

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_{ЛА} & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & i_{ЛВ} & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & i_{ЛС} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & i_{НА} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & i_{НВ} & 0 \\
 \underline{Z}_{ЛА} & 0 & 0 & \underline{Z}_{НА} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_N \times i_{НС} & = \dot{U}_A \\
 0 & \underline{Z}_{ЛВ} & 0 & 0 & \underline{Z}_{НВ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_N i_{СА} & \dot{U}_B \\
 0 & 0 & \underline{Z}_{ЛС} & 0 & 0 & \underline{Z}_{НС} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_N i_{СВ} & \dot{U}_C \\
 \underline{Z}_{ЛА} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -jX_c & 0 & 0 & jXL & \underline{Z}_N & i_{СС} & \dot{U}_A \\
 0 & \underline{Z}_{ЛВ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -jX_c & 0 & jXL & \underline{Z}_N & i_L & \dot{U}_B \\
 0 & 0 & \underline{Z}_{ЛС} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -jX_c & jXL & \underline{Z}_N & i_N & \dot{U}_C
 \end{array} \tag{2.29}$$

$j := \sqrt{-1}$ $f := 50$ $\omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 314.159$	Определение постоянных для расчета
$U_A := 220 \cdot e^{j \cdot 0 \cdot \text{deg}}$ $U_B := 220 \cdot e^{-j \cdot 120 \cdot \text{deg}}$ $U_C := 220 \cdot e^{j \cdot 120 \cdot \text{deg}}$	Фазные ЭДС симметричного источника
$Z_{HA} := 8.5$ $Z_{HB} := 8.5$ $Z_{HC} := 8.5$	Сопротивление фаз потребителя
$Z_A := 0.368 + j \cdot 0.134$ $Z_B := 0.368 + j \cdot 0.134$ $Z_C := 0.368 + j \cdot 0.134$ $Z_N := 0.368 + j \cdot 0.134$	Сопротивление фазных и нейтрального проводов ЛЭП
$C := 11 \cdot 10^{-6}$ $L := 0.307$	Параметры симметрирующего устройства
$X_{CA} := \frac{1}{\omega \cdot C} = 289.373$ $X_{CB} := \frac{1}{\omega \cdot C} = 289.373$ $X_{CC} := \frac{1}{\omega \cdot C} = 289.373$ $XL := \omega \cdot L = 96.447$	Сопротивление элементов симметрирующего устройства
$A := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ Z_A & 0 & 0 & Z_{HA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_N \\ 0 & Z_B & 0 & 0 & Z_{HB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_N \\ 0 & 0 & Z_C & 0 & 0 & Z_{HC} & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_N \\ Z_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -j \cdot X_{CA} & 0 & 0 & j \cdot XL & Z_N \\ 0 & Z_B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -j \cdot X_{CB} & 0 & j \cdot XL & Z_N \\ 0 & 0 & Z_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -j \cdot X_{CC} & j \cdot XL & Z_N \end{pmatrix}$	$C := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix}$
Система уравнений в матричной форме записи	

$B := A^{-1} \cdot C =$		0	Решение матричного уравнения. Комплексные значения токов элементов цепи
	0	24.836+0.673i	
	1	-11.107+21.14i	
	2	-13.729-21.813i	
	3	24.818-0.421i	
	4	-12.127+21.675i	
	5	-12.691-21.254i	
	6	0.019+1.093i	
	7	1.02-0.534i	
	8	-1.039-0.559i	
	9	0	
10	$7.438 \cdot 10^{-15} - 2.331i \cdot 10^{-15}$		
$IA := \text{submatrix}(B, 2, 2, 0, 0)$ $ IA = 25.774$ $IB := \text{submatrix}(B, 1, 1, 0, 0)$ $ IB = 23.88$ $IC := \text{submatrix}(B, 0, 0, 0, 0)$ $ IC = 24.845$			Определение искомых величин и их модулей
$PA := \text{Re}(ZA) \cdot (IA)^2$ $PB := \text{Re}(ZB) \cdot (IB)^2$ $PC := \text{Re}(ZC) \cdot (IC)^2$ $PA := ZA \cdot (IA)^2 = 260.167$ $PB := ZB \cdot (IB)^2 = 223.341$ $PC := ZC \cdot (IC)^2 = 241.754$ $PA + PB + PC = 725.263$			Определение потерь в ЛЭП и их сумма

Рисунок 2.10 – Программа расчета потерь электрической энергии при несимметричных режимах в сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством [95]

Разработанную программу RASPOТ-1 [95], позволяющую выполнить расчеты потерь электрической энергии электрической сети 0,4 кВ при включении симметрирующего устройства, можно использовать для дальнейшего исследования. Результаты расчетов представлены в главе 4.

2.5 Исследование переходных процессов в сети с симметрирующим устройством

При включении и отключении регулируемых СУ в них возникают переходные процессы. Переходные процессы, обычно быстро протекающие: их

длительность, составляет десятые, сотые, а иногда и тысячные доли секунды. Изучение переходных процессов весьма важно, так как необходимо выявить превышения напряжения на отдельных участках цепи, которые могут оказаться опасными для изоляции электроустановок, увеличения амплитуд токов, а также определять продолжительность переходного процесса [96]. Броски тока и напряжения отрицательно сказываются на конденсаторах и на электрически близко расположенном электрооборудовании. При воздействии перенапряжений резко снижается надежность конденсаторов СУ и их срок службы [96].

Рассмотрим сначала процесс включения симметрирующего устройства. Наличие двух накопителей энергии обуславливает переходный процесс, описываемый системой дифференциальных уравнений второго порядка, во время которого ток через конденсатор и напряжение на конденсаторе могут превысить свои установившиеся значения [96].

2.5.1 Расчет переходных процессов в сети с симметрирующим устройством на ЭВМ

Рассмотрим, как производится решение системы уравнений численным методом с использованием в пакете MathCad стандартной функции интегрирования `rkfixed`. Эта функция предназначена для численного интегрирования дифференциальных уравнений в форме Коши с начальными условиями методом Рунге-Кутты четвертого порядка (`rk`) с фиксированным шагом (`fixed`). Система уравнений в форме Коши для мгновенных значений тока i и напряжения u_c схемы замещения для первого этапа коммутации имеет вид [96]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_U) - (r+R) \cdot i - u_c}{\frac{x_{Lл} + x_L}{\omega}} = \frac{u(t) - (r+R) \cdot i - u_c}{L_{л} + L}, \quad (2.30)$$

где U – фазное напряжение, В;

ω – угловая частота, рад/с;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током;

r – активное сопротивление линии, Ом;

R – сопротивление нагрузки, Ом;

i – мгновенное значение тока;

U_C – напряжение на конденсаторе, В;

$X_{Lл}$ – сопротивление линии, Ом;

X_L – реактивное сопротивление индуктивной катушки, Ом;

L – индуктивность, Гн.

$$\frac{du_C}{dt} = x_C \cdot \omega \cdot i = \frac{1}{C} \cdot i, \quad (2.31)$$

где X_C – реактивное сопротивление конденсатора, Ом;

C – емкость конденсатора, мкФ.

Для интегрирования дифференциальных уравнений (2.32) и (2.33) введем компьютерные переменные $x_0=i$, $x_1=U_C$. После замены переменных дифференциальные уравнения примут вид:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{u(t) - (r+R) \cdot x_0 - x_1}{L} \quad (2.32)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{C} \cdot x_0 \quad (2.33)$$

Начальные условия (НУ) и производные функций задаются в виде векторов x и $D(t, x)$. В скобках функции D сначала указывается переменная, по которой берется производная и отыскивается интеграл (в нашем случае это время t), и далее через запятую указывается функция, от которой берется производная (в нашем случае это вектор неизвестных x , содержащий в столбце две неизвестных x_0 и x_1).

$$U := 220 \quad f := 50$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

Определение постоянных для расчета

$$uA(t) := \sqrt{2} U \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{Напряжение для фазы A}$$

$$r := 1.712 \quad \text{Сопротивление линии ЛЭП}$$

$$R := 0 \quad \text{Сопротивление нагрузки}$$

$$CA := 4 \times 10^{-6} \quad LA := 0.094 \quad \text{Параметры симметрирующего устройства для фазы A}$$

$$ImA := \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \cdot LA - \frac{1}{\omega \cdot CA}\right)^2}} \quad \text{Амплитудное значение тока}$$

$$UCmA := \left(\omega \cdot LA - \frac{1}{\omega \cdot CA}\right) \cdot ImA \quad \text{Амплитудное значение напряжения на конденсаторе}$$

$$xA := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Вектор начальных условий: ток в индуктивности и напряжение на конденсаторе СУ в момент включения } t = 0$$

$$DA(tA, xA) := \begin{bmatrix} \frac{uA(tA) - (R + r) \cdot xA_0 - xA_1}{LA} \\ \frac{1}{CA} \cdot xA_0 \end{bmatrix} \quad \text{Вектор производных тока в индуктивности и напряжения на конденсаторе СУ}$$

$$ZA := \text{rkfixed}(xA, 0, 0.5, 5000, DA) \quad \text{Задание матрицы решения}$$

$$nA := 0..5000 \quad \text{Количество точек на интервале}$$

$$tA_{nA} := ZA_{nA,0} \quad iA_{nA} := ZA_{nA,1} \quad uA_{nA} := ZA_{nA,2} \quad \text{Время, ток в фазе A, мгновенное значение напряжение фазы A}$$

$$UCM1A := \max(uA) \quad UCM2A := \min(uA)$$

$$UCMA := \text{if}(|UCM1A| > |UCM2A|, UCM1A, |UCM2A|) = 363.43$$

$$iCM1A := \max(iA) \quad iCM2A := \min(iA)$$

$$iCMA := \text{if}(|iCM1A| > |iCM2A|, iCM1A, |iCM2A|)$$

$$kuA := \frac{UCMA}{UCmA} \quad kiA := \frac{iCMA}{ImA} \quad \text{Кратность напряжения на конденсаторе СУ} \quad \text{Кратность тока через конденсатор СУ}$$

$$kuA = -1.168 \quad kiA = 1.81$$

Рисунок 2.11 – Программа расчета переходных процессов в сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством.

Представленный расчет переходных процессов в симметрирующем устройстве выполнен для фазы А. Аналогичным образом осуществляется расчет для фаз В и С.

Решение системы из n дифференциальных уравнений с помощью функции `rkfixed` получается в виде матрицы, содержащей $n+1$ столбцов. На рисунке 2.11 такая матрица обозначена буквой Z . Первый столбец матрицы содержит точки, в которых ищется решение системы дифференциальных уравнений. Эти точки соответствуют времени t . Вторым столбцом матрицы соответствует току i в заданных точках, а третий – напряжению u_C на конденсаторе в тех же точках. Матрица Z решения системы уравнений, отыскиваемая с помощью функции `rkfixed`, задается следующим образом [96]:

$$Z = \text{rkfixed}(x, 0, 0.5, 5000, D) \quad (2.34)$$

В скобках функции перечисляются через запятую: вектор начальных условий, начальная (0) и конечная (0,5) точки интегрирования, число точек (5000) на интервале интегрирования, не считая нулевой точки, и функция D первых производных искомых функций. На рисунке 2.12 решение отыскивается на интервале от 0 до 0,5 с в виде 5000 точек. При переходе от одной точки к другой время изменяется на $0,5/5000=0,0001$ с или на 10^{-4} с. Для построения графиков искомых величин по оси абсцисс откладывают время, а по оси ординат – ток и напряжение. Для этого вводят переменную $n=5000$, равную количеству точек интегрирования и выражают время, ток, напряжение как индексные переменные, входящие в матрицу Z : t_n (нулевой столбец $Z_{n,0}$), i_n (первый столбец $Z_{n,1}$), u_n (второй столбец $Z_{n,2}$). Далее строятся графики (рисунок 2.12) [96].

Кратность бросков тока и напряжения наиболее просто можно определить следующим образом. Поскольку в зависимости от начальной фазы питающего напряжения максимальное значение напряжения на конденсаторе может быть в положительном или отрицательном полупериоде, то с помощью функций $\max(u)$ и $\min(u)$ определяют максимальное (положительное) и минимальное (отрицательное) значения напряжения. Далее с помощью функции `if` с условием (если) в зависимости от значения модуля этих функций выбирают наибольшее значение напряжения. Если максимальное значение напряжения больше, чем модуль минимального значения напряжения, то за максимальное значения напряжения на конденсаторе принимают максимального значения напряжения (в

положительном полупериоде). Если же это условие не соблюдается, то за максимальные значения напряжения на конденсаторе принимают модуль минимального значения напряжения (в отрицательном полупериоде) [96].

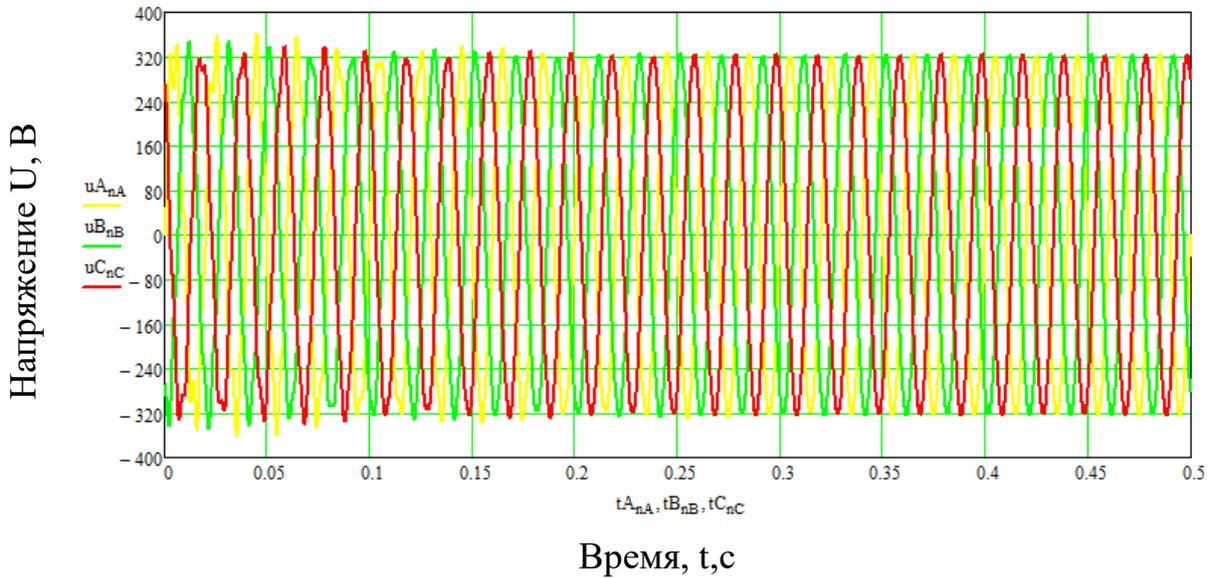


Рисунок 2.12 - Переходный процесс при начальной фазе напряжения, равной нулю при нулевых начальных условиях.

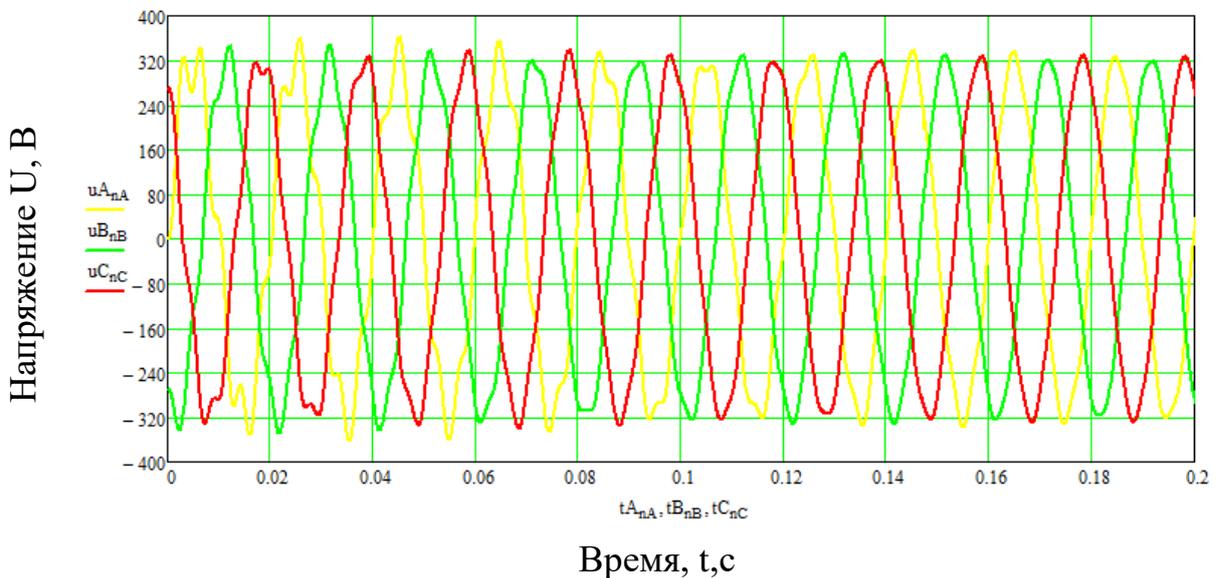


Рисунок 2.13 – Переходный процесс при начальной фазе напряжения, равной нулю при нулевых начальных условиях с t до 0,2 с.

Приведенные на рисунке 2.12 кривые, получены на математической модели в интегрированном пакете MathCad при указанных выше параметрах СУ.

Исследования переходных процессов показали, что перенапряжения при коммутациях составляют 16 % от $U_{ном}$ и заканчиваются через 10 периодов (0,2 с) (рисунок 2.13), что соответствует [97].

2.6 Исследование уровня несимметрии токов и напряжений в сельских электрических сетях 0,4 кВ на примере сельских электрических сетей Нижегородской области

Для расчёта токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, а также показателей качества электрической энергии в электрических сетях воспользуемся методом симметричных составляющих.

Применяя данный метод, необходимо знать модули и аргументы несимметричной системы токов и напряжений [10].

Измерения необходимых величин осуществлялось с помощью портативного анализатора качества электрической энергии CIRCUTOR AR.5L (рисунок 2.14).

CIRCUTOR AR.5L. предназначен для измерения качественных и количественных показателей электроэнергии в однофазных, трех- и четырехпроводных трехфазных сетях переменного тока. Прибор применяется при обследовании электросетей с целью построения графиков потребления активной и реактивной мощности, определения показателей качества энергии, проверки приборов и систем учета, подбора фильтрокомпенсирующего оборудования, обнаружения утечек электроэнергии и неисправностей электрооборудования. Электроанализатор имеет все необходимое для работы в портативном режиме: небольшой вес, автономное питание, большую память для хранения данных и возможность перепрограммирования для решения разнообразных задач [97].

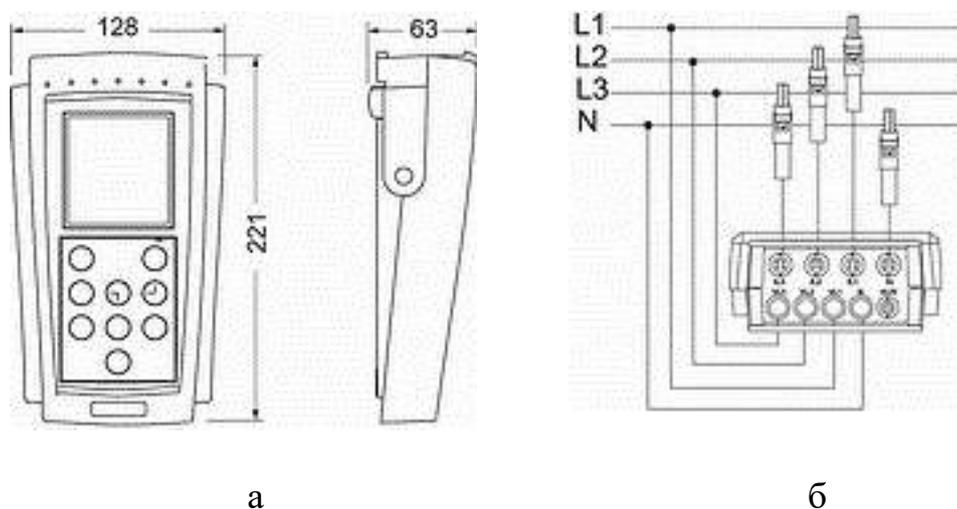


Рисунок 2.14 – Внешний вид (а) и схема подключения (б) анализатора качества электроэнергии CIRCUTOR AR.5L [97]

Анализатор подключается с помощью датчиков тока и потенциальных проводов к одно- или трехфазной сети 220/380В или к измерительным трансформаторам тока и напряжения сетей 6/10 кВ и выше. Прибор имеет 3 канала измерения тока и 3 напряжения (модель AR.5L оснащена дополнительным каналом для измерения тока в нейтральном проводе). Сменными датчиками тока служат клещи или гибкие кольца номиналом от единиц до тысяч ампер. К трансформаторам тока с выходом 5А подключение производится с помощью клещей 5А или специального 3-х фазного шунта. По измеренным величинам процессор рассчитывает параметры, которые отображаются на графическом ЖК-дисплее и записываются в память прибора, откуда затем считываются на компьютер, снабженный программным обеспечением POWERVISION для визуализации, обработки и анализа накопленной информации. Программное обеспечение Circutor Power Vision 1.8 предназначено для работы в операционной среде Windows и позволяет выполнить быстрый и точный анализ любой электрической системы, которая была обследована при помощи прибора AR.5L.

В зависимости от типа анализируемой сети измеряются и могут быть сохранены в памяти, следующие перечисленные параметры (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Параметры, регистрируемые CIRCUTOR AR.5Lв трехфазной сети [97]

Параметр	Обозначение	L1	L2	L3	Трехфазное значение
Напряжение фаза-нейтраль	V	X	X	X	
Ток	A	X	X	X	X
Ток нейтрали	I_N			X	
Частота	Hz	X			
Активная мощность	kW	X	X	X	X
Реактивная мощность L (индуктивная)	kvarL	X	X	X	X
Реактивная мощность C (емкостная)	kvarC	X	X	X	X
Полная мощность	kVA				X
Коэффициент мощности	PF	X	X	X	X
Активная энергия	kWh				X
Реактивная энергия L	kvarhL				X
Реактивная энергия C	kvarhC				X
Гармоники напряжения		X	X	X	
Гармоники тока		X	X	X	
Гармоники тока нейтрали				X	

С помощью токовых клещей измеряют токи: I_A , I_B , I_C , I_N . Измеряются так же фазные и междуфазные напряжения.

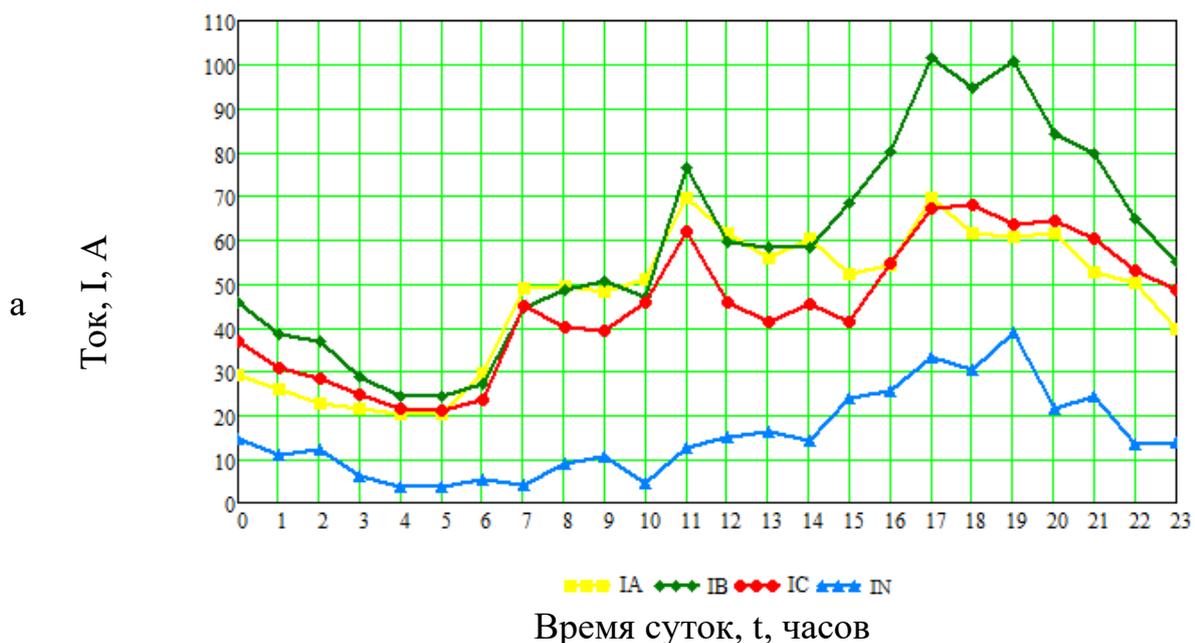
Таким образом, для определения комплексов симметричных составляющих токов и напряжений методом симметричных составляющих необходимо произвести замеры следующих величин: U_A , U_B , U_C , и I_A , I_B , I_C , I_N , $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, $\cos\varphi_C$ [11].

Для проведения анализа ПКЭ были рассмотрены режимы работы действующих распределительных сетей 0,4 кВ. Анализ производился для следующих видов нагрузок: коммунально-бытовой, производственной и административной. Замеры токов и напряжений для указанных видов нагрузок проводились в характерные зимние сутки (22 декабря 2016 г.) и сутки, ближайšie к указанной дате.

Коммунально-бытовой нагрузкой служит общежитие № 1 ГБОУ ВО НГИЭУ (вместимость 500 человек); производственной – ООО «АП Соловьевское», административной – учебно-административный корпус ГБОУ ВО НГИЭУ. Коммунально-бытовая и административная нагрузка (120 кВ·А и 85 кВ·А соответственно) получают питание по воздушной линии СИП – 2 сечением 35 мм² от ТП – 520 мощностью 400 кВ·А. Производственная нагрузка (150 кВА) получает питание от ЗТП – 134 мощностью 250 кВ·А посредством воздушной линии длиной 400 м, выполненной проводом А 35.

На рисунке 2.15 представлены графики изменения токов при различных видах нагрузки. Эти графики наглядно показывают степень несимметрии токов в фазах линии.

Анализируя графики нагрузок можно сделать вывод о проявлении в наибольшей степени несимметрии токов в ЛЭП, питающей коммунально-бытовую нагрузку (рисунок 2.14. в), разница токов в фазах достигает 40 – 50 А, при этом ток в нейтральном проводе достигает значений 75 – 90 % тока наиболее загруженной фазы. Токи такого уровня оказывают негативное влияния на состояние нейтрального провода: старение изоляции [11] от чрезмерного перегрева, а также обгорание в месте присоединения, что однозначно приводит к аварийному режиму сети, а также может стать причиной пожара.



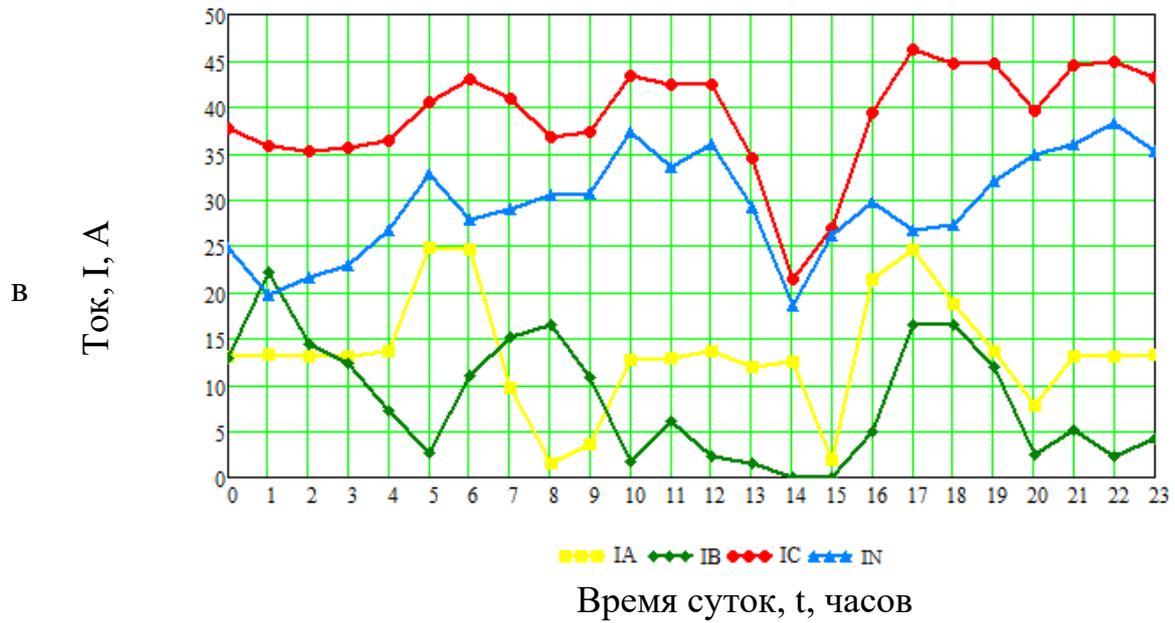
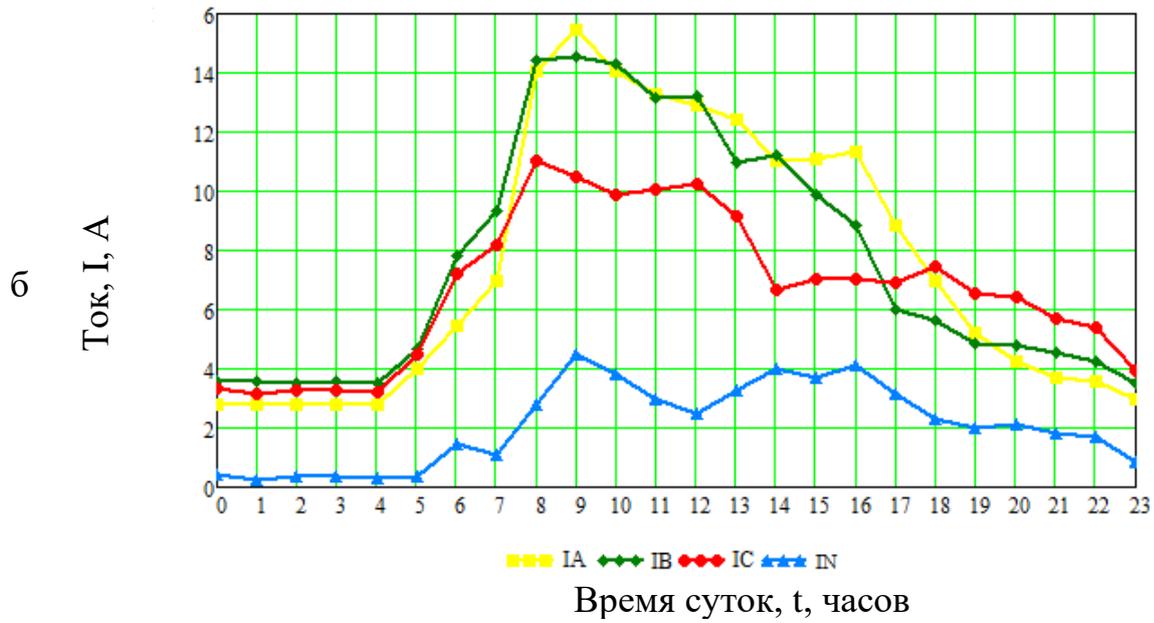
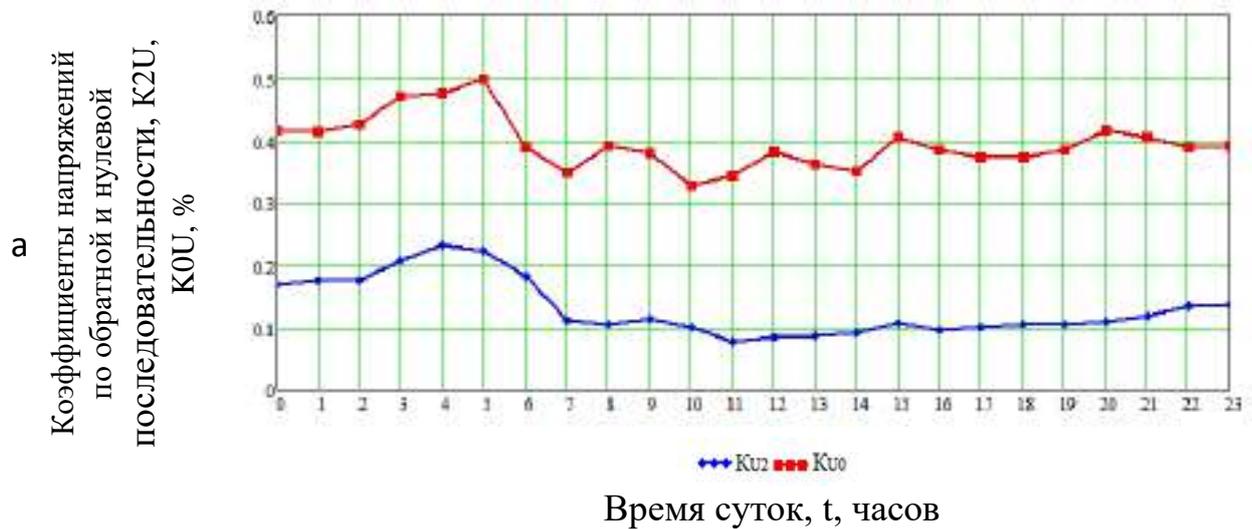


Рисунок 2.15 – Временные диаграммы изменения токов при различной нагрузке:
а – производственной; *б* – административной;
в – коммунально-бытовой



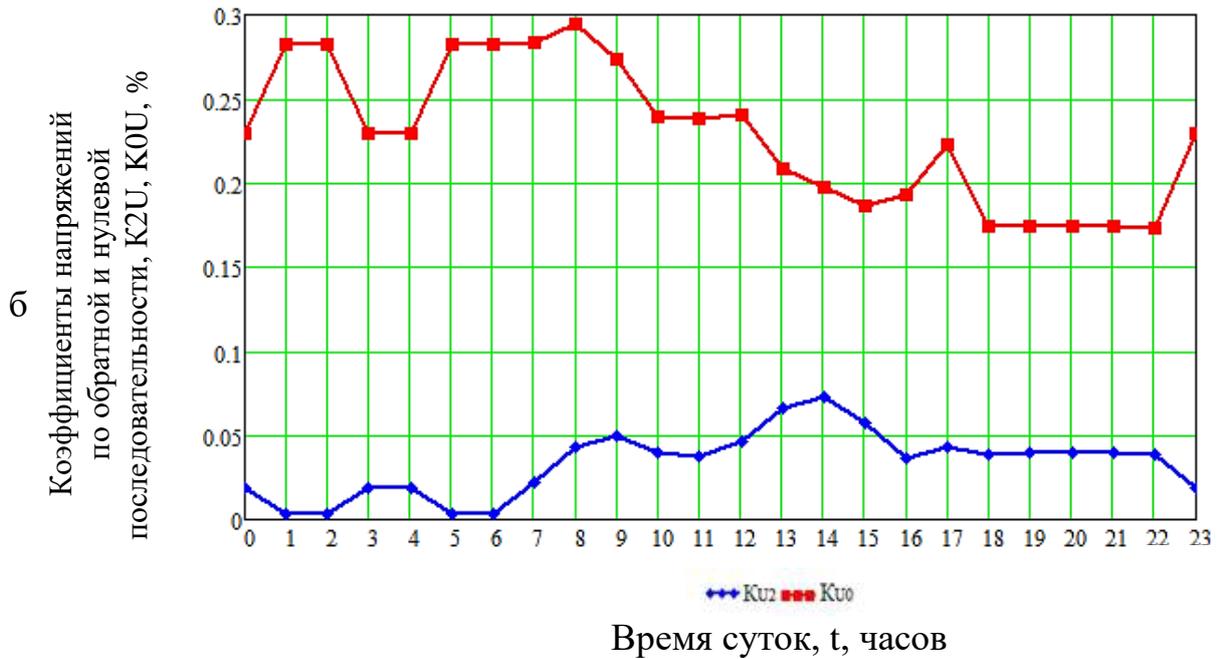


Рисунок 2.16 – Временные диаграммы изменения коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжения при различной нагрузке: *а* – производственной; *б* – административной; *в* – коммунально-бытовой;



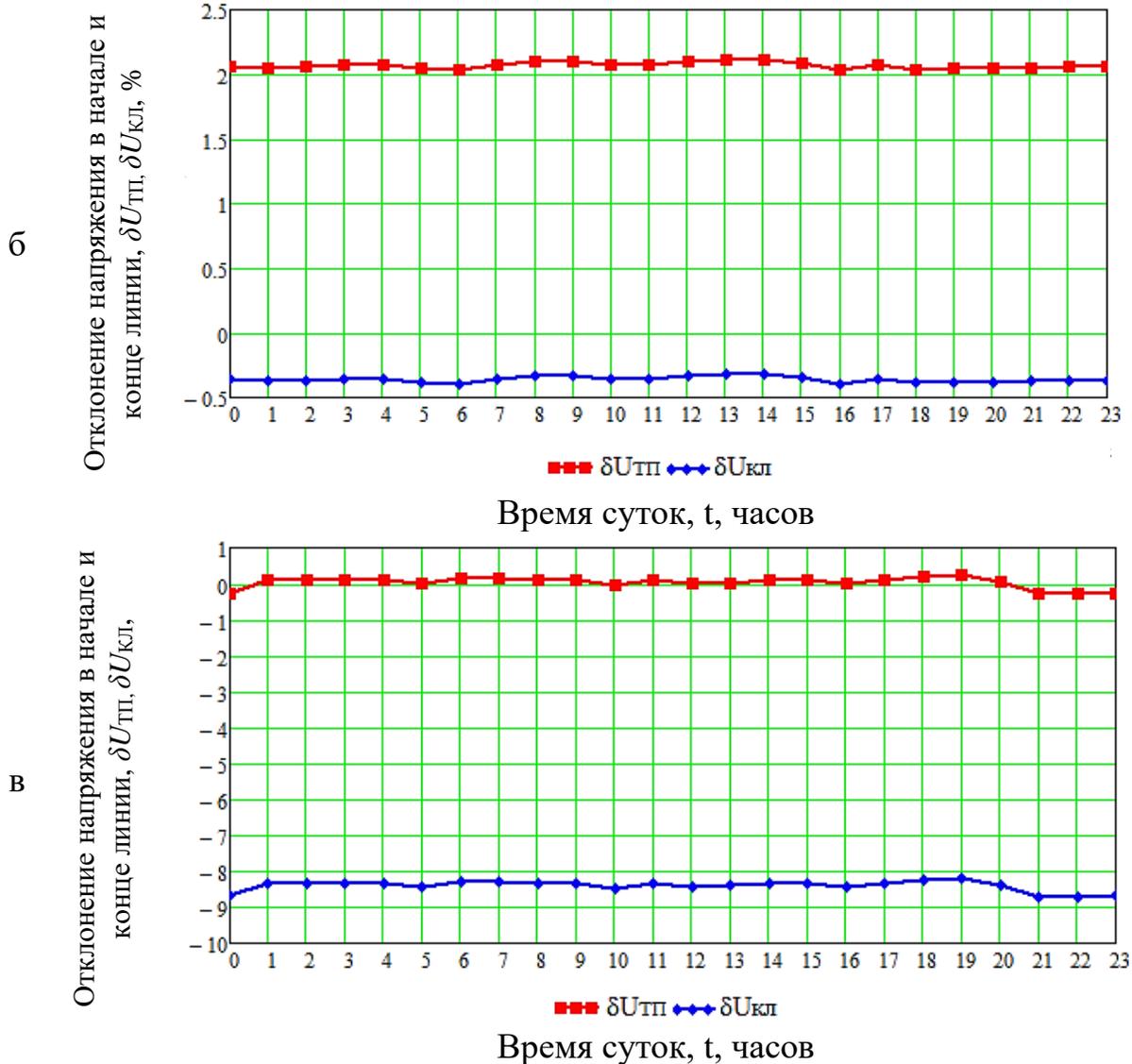


Рисунок 2.17 – Временные диаграммы отклонения напряжения при различной нагрузке: *а* – производственной; *б* – административной; *в* – коммунально-бытовой; $\delta U_{\text{ТП}}$ – отклонение напряжения в начале линии; $\delta U_{\text{КЛ}}$ – отклонение напряжения в конце линии

На рисунке 2.16 представлены графики изменения коэффициентов обратной и нулевой последовательностей при тех же видах нагрузки. Полученные значения в 2-4 раза превышают значения, установленные ГОСТом.

Максимальные значения исследуемых коэффициентов наблюдаются при коммунально-бытовой нагрузке 9 % и 1,5 % соответственно.

При анализе изменения отклонения напряжения в зависимости от вида нагрузки (рисунок 2.17) можно сказать следующее: максимальное отклонение напряжения наблюдается в конце линии 0,4 кВ при коммунально-бытовой

нагрузке. Исследуемый показатель качества изменяется в интервале от -8 до $+0,13$ %. При других видах нагрузки отклонение напряжения по всей длине линии находится в пределах нормы.

Причиной значительных отклонений напряжения является, прежде всего, присутствие большого числа однофазных электроприемников (калориферные установки, подогреватели воды, освещение), а, следовательно, несимметрии токов [11].

Для наглядного представления о состоянии сельских распределительных сетей 0,4 кВ с точки зрения отрицательного воздействия несимметрии нагрузок на ПК Э и потери мощности воспользуемся статистической обработкой [100, 101].

Анализ проведем по следующей методике [11]:

1. Определяем среднее значение коэффициентов несимметрии напряжений:

$$K_{2UCP} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{2Ui}}{n}, \quad K_{0UCP} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{0Ui}}{n}, \quad (2.35)$$

где K_{2Ui} – значения коэффициентов обратной последовательности в момент измерения;

K_{0Ui} – значения коэффициентов нулевой последовательности в момент измерения;

n – количество измерений.

2. Определяем дисперсию, которая позволяет оценить каково отклонение совокупности данных от значения ГОСТа.

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x - x_{ГОСТ})^2}{n}, \quad (2.36)$$

где x – значение i -го наблюдения;

$x_{ГОСТ}$ – значение, установленное ГОСТ [28].

3. Среднеквадратичное значение определится как квадратный корень из дисперсии:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_{ГОСТ})^2}{n}}, \quad (2.37)$$

4. Для наглядного представления об отклонении исследуемых величин от значения ГОСТ составим таблицу распределения этих значений (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Распределение K_{0U} при коммунально-бытовой нагрузке

Интервал изменения K_{0U}	Значение K_{2U} в интервалах, %
0 – 1,0	5
1,1 – 2,0	6
2,1 – 3,0	6
3,1 – 4,0	2
4,1 – 5,0	2
5,1 – 6,0	2
6,1 – 7,0	-
7,1 – 8,0	-
8,1 – 9,0	-
9,1 – 10	1

5. Определим вероятность появления исследуемого значения

$$P(x) = \frac{x}{N}, \quad (2.38)$$

где N – сумма значений измерений.

Таблица 2.3 – Закон распределения K_{2U} при коммунально-бытовой нагрузке

Значение K_{0U}	Вероятность появления
1	0,208
2	0,250
3	0,250
4	0,083
5	0,083
6	0,083
7	0
8	0
9	0
10	0,041

6. Построим полигон и гистограмму распределения для коэффициента нулевой последовательности напряжения при коммунально-бытовой нагрузке (рисунок 2.18 – 2.19).

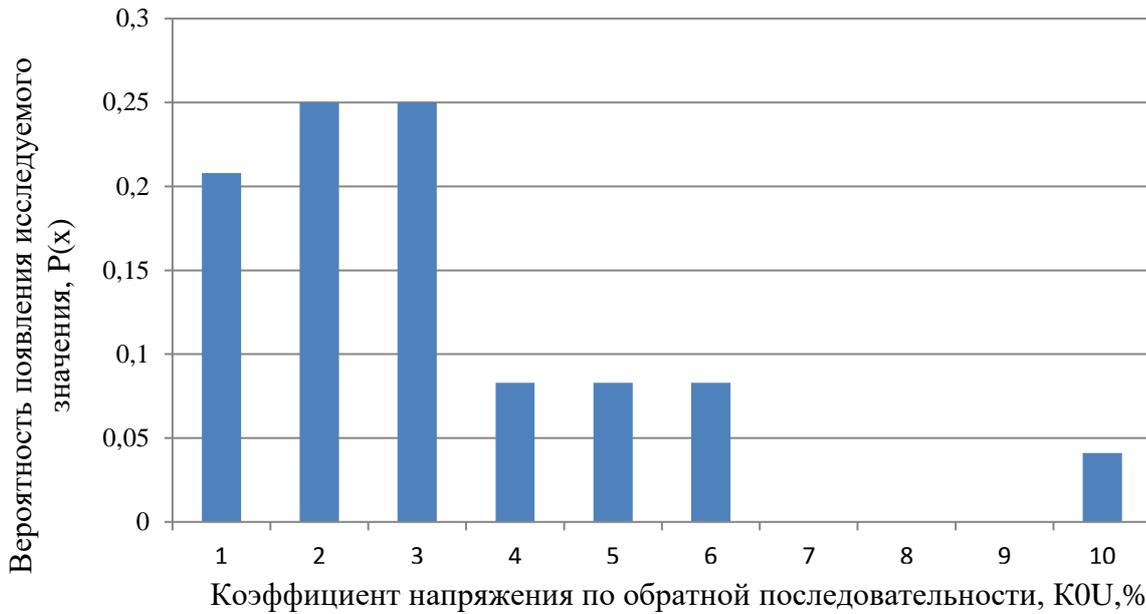


Рисунок 2.18 – Гистограмма распределения коэффициента нулевой последовательности напряжения при коммунально-бытовой нагрузке



Рисунок 2.19 – Полигон распределения коэффициента обратной последовательности напряжения при коммунально-бытовой нагрузке

По рассмотренному алгоритму проведена статистическая обработка коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжения для трёх видов нагрузок в исследуемых распределительных сетях 0,4 кВ, питающих различные виды нагрузок: коммунально-бытовую, производственную и административную. Результаты расчётов приведены в таблицах 2.4 – 2.5. Расчёт

поведён для нормального (2%) значения исследуемых показателей качества электрической энергии.

Таблица 2.4 – Результаты расчётов коэффициента обратной последовательности напряжения

Нагрузка	$K_{0УСР}$	δ^2	δ
	$K_{0U} = 2 \%$		
Производственная	0,395	2,576	1,605
Административная	0,229	3,138	1,771
Коммунально-бытовая	2,678	4,851	2,202

Таблица 2.5 – Результаты расчётов коэффициента нулевой последовательности напряжения

Нагрузка	$K_{2УСР}$	δ^2	δ
	$K_{2U} = 2 \%$		
Производственная	0,131	3,496	1,87
Административная	0,033	3,869	1,967
Коммунально-бытовая	0,533	2,313	1,521

По результатам произведённых статистических исследований коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжения, можно сделать следующие выводы:

1. Среднее значение K_{0U} выходят за предел, установленный ГОСТ в 2 % при коммунально-бытовой нагрузке в 80 % исследуемого времени и в 29 % времени выходят за пределы предельно допустимого значения 4 %.

2. Определение дисперсии позволило оценить степень разброса исследуемых значений K_{2U} и K_{0U} вокруг значения в 2 %. Самое большое значение дисперсии наблюдается при коммунально-бытовой нагрузке – 3,869 %² по обратной последовательности и по нулевой – при административной нагрузке 4,851 %².

3. Анализ среднего квадратического отклонения показывает, что наибольшее отклонение у исследуемых коэффициентов наблюдается при коммунально-бытовой нагрузке и составляет 2,202 % для K_{0U} и при административной нагрузке – 1,967 % для K_{0U} .

4. Закон распределения исследуемых величин показывает, какова вероятность появления анализируемого значения. Наибольшую вероятность появления имеет значение 2 и 3% при коммунально-бытовой нагрузке. Максимальная вероятность появления этих значений составляет 0,250.

2.7 Исследование дополнительных потерь электроэнергии, связанных с несимметрией токов и напряжений в сельских распределительных сетях 0,4 кВ на примере сельских электрических сетей Нижегородской области.

Несимметрия токов по обратной и нулевой последовательностям приводит к значительным дополнительным потерям мощности и электрической энергии, которые можно оценить коэффициентом увеличения соответствующих потерь. Этот коэффициент представляет собой отношение потерь мощности в несимметричном режиме к потерям мощности, обусловленным протеканием токов только прямой последовательности [1]. На основе произведённых измерений по выражению (2.15) определим коэффициент дополнительных потерь от несимметрии токов и напряжений в сети 0,4 кВ [1].

На рисунке 2.20 представлены графики изменения коэффициента дополнительных потерь мощности.

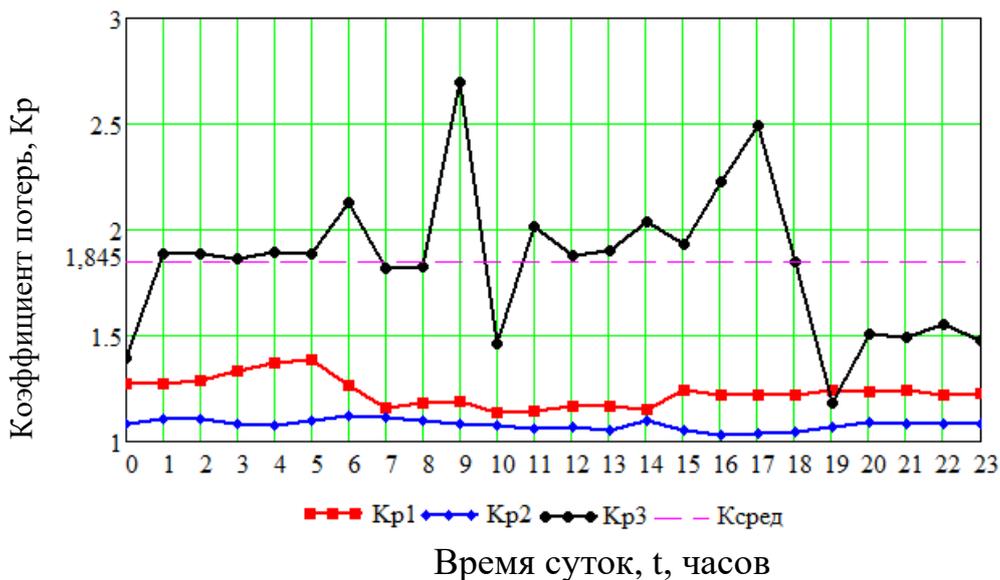


Рисунок 2.20 – Временные диаграммы изменения коэффициента дополнительных потерь мощности при различной нагрузке: K_{p1} – производственной; K_{p2} – административной; K_{p3} – коммунально-бытовой; $K_{сред}$ – среднее значение коэффициента потерь

Анализ полученных зависимостей показал, что наибольшее значение коэффициента K_p характерно для коммунально-бытовой нагрузки. Среднее значение K_p составляет 1,845, то есть потери мощности на 84,5% превышают соответствующие потери в симметричном режиме работы.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали наличие в рассматриваемой электрической сети присутствие несимметрии токов и напряжений, что отрицательно влияет на качество электрической энергии, вызывает значительные потери мощности [11].

Для решения этой проблемы необходима всесторонняя оценка возможных мероприятий и использование различных вариантов технических решений, позволяющих уменьшить несимметрию токов и напряжений и тем самым снизить ток нулевой последовательности в рассматриваемых сельских электрических сетях 0,4 кВ [11].

2.8 Разработка требований к регулируемому симметрирующему устройству

Регулируемое симметрирующее устройство предназначено для снижения потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

Регулируемое симметрирующее устройство должно обеспечивать:

- контроль фазных напряжений действующей сети 0,4 кВ;
- определение уровня отклонения фазных напряжений от номинального значения напряжения;
- заданное быстроедействие и регулируемое симметрирование токов и напряжений в действующей сети;
- снижение потерь электрической энергии в сетях 0,4 кВ;
- работу устройства согласно заданному алгоритму регулирования.

2.9 Выводы по главе 2

1. Разработан способ регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ, который выполняет поддержание в норме основных параметров качества и снижения потерь электрической энергии за счет использования в качестве управляющего параметра несимметрии фазных напряжений.

2. Представлено математическое моделирование электрической сети 0,4 кВ с регулируемым симметрированием, которое позволяет выполнить расчеты коэффициентов токов по обратной и нулевой последовательностям, выполнить расчет коэффициента дополнительных потерь от несимметрии токов и напряжений электрической энергии электрической сети 0,4 кВ без симметрирующего устройства, а так же при его включении;

3. Разработана программа RASPOТ-1 для расчета потерь электрической энергии электрической сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством. На программу получено свидетельство Роспатента о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ.

4. Исследования переходных процессов в сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством показали, что перенапряжения при коммутациях составляют 16 % от $U_{ном}$ и заканчиваются через 10 периодов (0,2 с), что соответствует ПУЭ.

5. Произведён анализ уровня несимметрии токов и напряжений в действующих в сельских распределительных сетях 0,4 кВ на примере отдельных сельских электрических сетей Нижегородской области. В результате анализа установлено:

- среднее значение K_{OU} выходят за предел, установленный ГОСТ в 2 % при коммунально-бытовой нагрузке в 80 % исследуемого времени и в 29 % времени выходят за пределы предельно допустимого значения 4 %;

- анализ среднего квадратического отклонения показывает, что наибольшее отклонение у исследуемых коэффициентов наблюдается при коммунально-

бытовой нагрузке и составляет 2,202 % для K_{0U} и при административной нагрузке – 1,967 % для K_{0U} ;

- закон распределения исследуемых величин показывает, что наибольшую вероятность появления имеет значение 2 и 3% при коммунально-бытовой нагрузке. Максимальная вероятность появления этих значений составляет 0,250;

- анализ показал, что наибольшее значение коэффициента K_p характерно для коммунально-бытовой нагрузки. Среднее значение K_p составляет 1,845, то есть потери мощности на 84,5% превышают соответствующие потери в симметричном режиме работы.

6. Выявленный уровень несимметрии токов и напряжений позволяет сделать вывод о том, что возможное применение специальных средств симметрирования не только позволит снизить потери электрической энергии в низковольтных сетях, но и значительно увеличить срок службы электрического оборудования за счёт повышения качества электрической энергии.

5. Сформированы функциональные требования к регулируемому симметрирующему устройству.

3 РАЗРАБОТКА НОВОГО РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА И ОБОСНОВАНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

3.1 Разработка схемы симметрирующего устройства для электрической сети 0,4 кВ

Устройство (рисунок 3.1) применяется для регулируемого симметрирования токов и напряжений трехфазной четырехпроводной сети при подключении к ней несимметричной нагрузки. Параметры предлагаемого устройства изменяются в зависимости от уровня несимметрии токов и напряжений в сети 0,4 кВ, имеющей место в данный момент времени, т.к. мощность устройства автоматически регулируется в функции уровня несимметрии фазных напряжений [92].

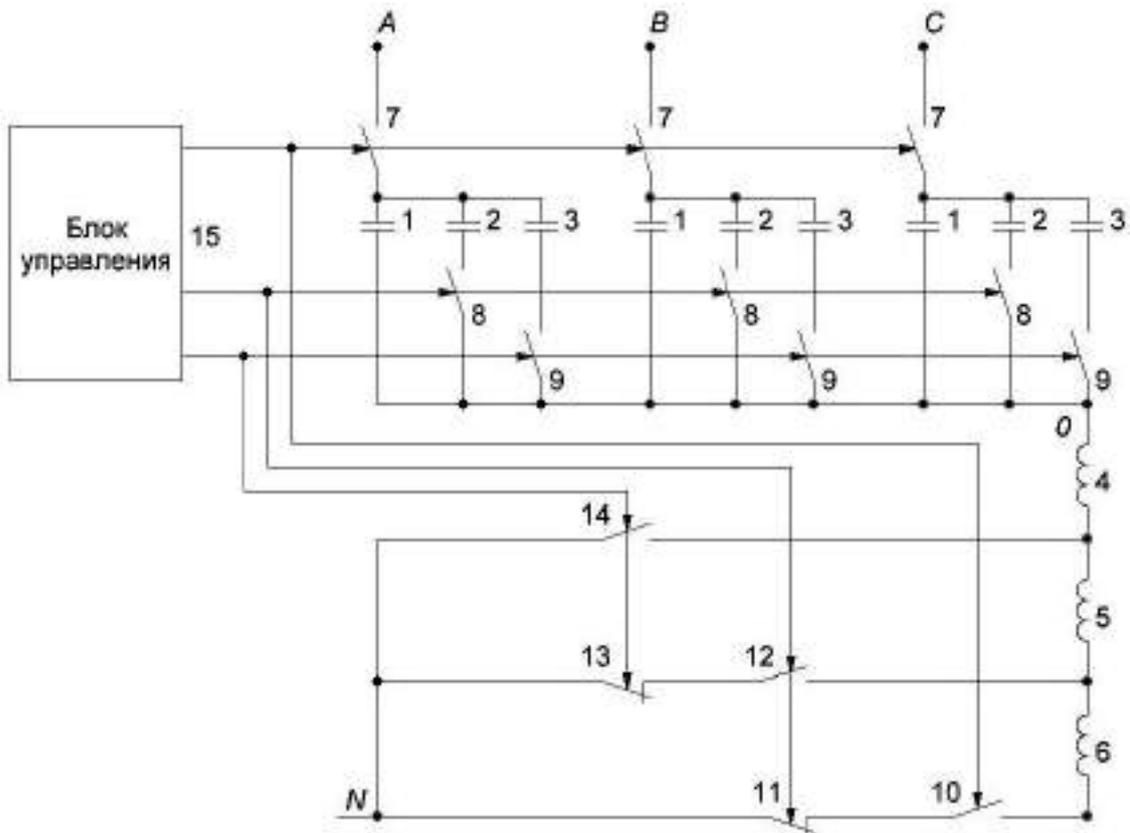


Рисунок 3.1 – Регулируемое симметрирующее устройство для трехфазной сети с параллельным соединением конденсаторов [92, 100]

Регулируемое симметрирующее устройство для трехфазной сети с нейтральным проводом состоит из емкостных элементов (1–3) соединённых в

звезду, индуктивных катушек (4–6), замыкающих контактов (7–10, 12, 14), размыкающих контактов (11, 13) и блока управления устройством (15). На первой ступени мощности подключаются три емкости (1) и индуктивные катушки (4–6). При возрастании несимметрии токов и напряжений подключается вторая ступень мощности, и мощность устройства увеличивается. Это достигается путем подключения дополнительных емкостей (2) и индуктивных катушек (4, 5). Индуктивная катушка 6 при этом отключается, и общая индуктивность уменьшается. При большем возрастании несимметрии подключается третья ступень мощности. Предлагаемое устройство полностью отключается от сети при достижении уровня фазных напряжений, заданного алгоритмом его работы [100, 89, 103].

Преимуществом данного СУ является то, что мощность устройства регулируется в зависимости от значений отклонений напряжений в каждой из фаз сети [103].

3.2 Разработка схемы управления регулируемого симметрирующего устройства.

Общий порядок управления включает в себя переключение ступеней, регулирование напряжения и измерение уровня контролируемого напряжения.

Симметрирующее устройство, представленное на рисунке 3.1 работает в функции уровня несимметрии фазных напряжений. Основными элементами данного устройства являются дифференциальные дискриминаторы и тиристорные двунаправленные ключи и RS-триггеры. [92]. Функциональная схема, поясняющая принцип управления схемы приведена на рисунке 3.2.

Блок управления состоит из трех дифференциальных дискриминаторов ДД1–ДД3, построенных на схеме 2ИЛИ-НЕ, которые вырабатывают на выходе логическую единицу в том случае, когда входное напряжение заключено между двумя порогами и равно логическому нулю во всех остальных случаях [103].

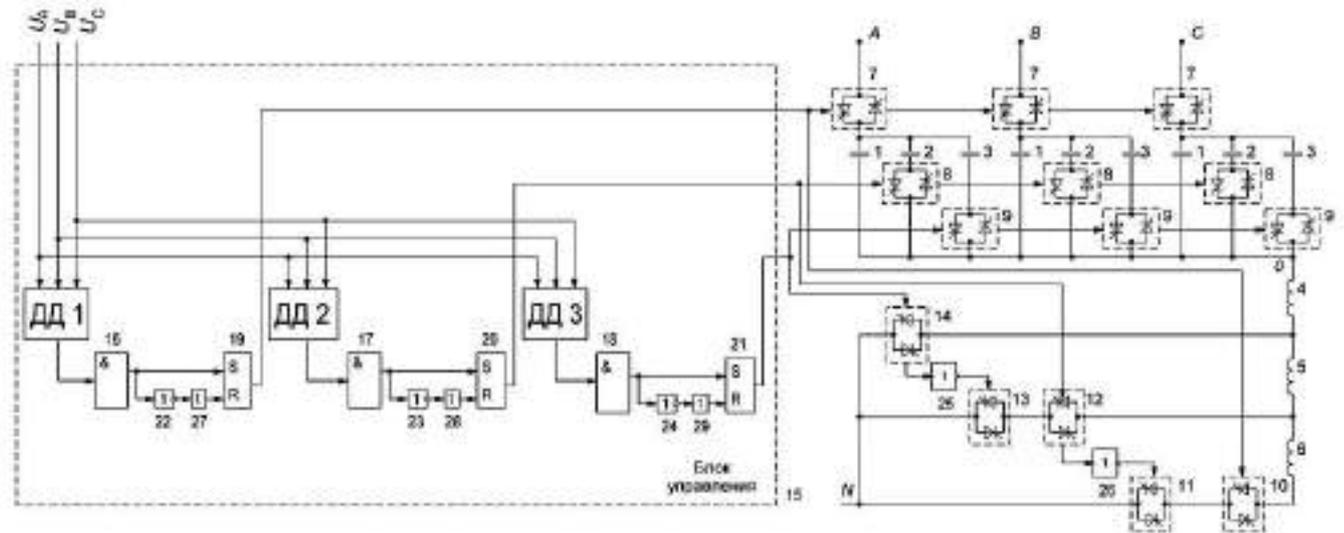


Рисунок 3.2- Схема управления регулируемым симметрирующим устройством [89]

В исходном состоянии с выводов дифференциальных дискриминаторов ДД1–ДД3 на логические элементы ИЛИ1–ИЛИ3 16, 17, 18 по даются логические нули, на выходах этих элементов также нули, таким образом, RS–триггеры 19, 20 21, находятся в нулевом (сброшенном) состоянии: напряжение на их прямых выходах имеет низкий потенциал, т.е. на всех прямых выходах RS–триггеров сигнал равен логическому нулю. Тиристорные двунаправленные ключи 7–9, 10, 12, 14 находятся в закрытом состоянии, ключи 11 и 13 – открыты через инвертирующие элементы НЕ 25 и 26, таким образом, СУ отключено от сети.

При отклонении фазного напряжения на величину ≥ -5 от $U_{ном}$, с выхода ДД1 на вход элемента ИЛИ1 (16) поступает логическая единица, на выходе элемента также получаем единицу. При поступлении единичного сигнала на вход RS–триггера 19 с задержкой времени, заданного элементом 27, на его прямом выходе получим высокий потенциал, при этом двунаправленные тиристорные ключи 7 и 10 перейдут в проводящее состояние, и включится первая ступень регулируемого СУ.

Включение второй и третьей степеней СУ возможно при большем отклонении значений одного из фазных напряжений. При большем отклонении

одного из фазных напряжений с выхода ДД2 поступает единичный сигнал на вход элемента ИЛИ2 (17), на вход RS–триггера 20 поступает единичный сигнал через элемент 28 и таким образом тот же сигнал поступает на тиристорные ключи 8, 12 и 11 через инвертирующий элемент НЕ 26. В схеме СУ происходит следующее: при замыкании ключей 8 и 12 подключается дополнительный емкостной (2) и индуктивные элементы (4 и 5), при этом отключается 11, выводя из цепи СУ индуктивность 6. Единичный сигнал с выхода элемента ИЛИ2 инвертируется через элемент НЕ 24, при этом мощность СУ «форсируется» за счет увеличения значений параметров реактивных элементов. Включается вторая ступень СУ.

При большем отклонении одного из фазных напряжений (U_A , U_B , U_C) подключается третья ступень регулируемого СУ. С ДД3 приходит логическая единица, сигнализирующая о большем отклонении напряжения по одной, двух или трех фаз. На вход 21 поступает положительный логический сигнал с задержкой времени, заданного элементом 29, при этом на выходе указанного RS–триггера (21) генерируется логическая единица – подключается третья ступень СУ, замыкается ключ 14 и через инвертирующий элемент НЕ 25 размыкается ключ 13 – таким образом, на второй и третьей ступени мощности СУ сохраняется условие резонанса напряжений, так как это является одним из основополагающих для снижения несимметрии и потерь, обусловленных несимметричными режимами.

Программирование ДД1–ДД3 позволяет управлять моментами включения-отключения ступеней регулируемого СУ [103]. В таблице 3.1 приводятся значения сигналов управляющих силовыми ключами при подключении соответствующей ступени мощности СУ.

Таблица 3.1. Значения управляющих сигналов на силовых ключах

Ключ \ Ступень	7	8	9	10	11	12	13	14
Откл.	0	0	0	0	1	0	1	0
1	1	0	0	1	1	0	1	0
2	1	1	0	1	0	1	1	0
3	1	1	1	1	0	1	0	1

Отключение СУ происходит при снижении уровня несимметрии фазных напряжений в обратной последовательности. При отсутствии несимметрии схема приводится в исходное состояние и готова к новому включению, после которого процессы повторятся в уже изложенной выше последовательности [89].

3.3 Имитационное моделирование работы симметрирующего устройства в сети 0,4 кВ

В ПУЭ сказано: «Для достижения наиболее экономичного режима работы электрических сетей с переменным графиком реактивной нагрузки следует применять автоматическое регулирование мощности конденсаторной установки путем включения и отключения ее в целом или отдельных ее частей...» [97], поэтому будем рассматривать СУ, включенное в моделируемую сеть на различные мощности.

При анализе модели (рисунок 3.4) выбирается решатель (*solver*) Ode23t. Решатель дифференциальных уравнений Ode23t – это метод трапеций с разносными уравнениями для умеренно жестких систем, обладающий повышенной скоростью интегрирования [104].

С помощью блока *Three –Phase Source* имитируется работа трехфазной четырехпроводной системы напряжений с соединением Y_n , где 3 источника напряжения соединены в звезду и подключены к нейтральному проводу. Блок *Three-Phase Series RLC Branch* имитирует активное и индуктивное сопротивление линии электропередачи 0,4 кВ, аналогичные сопротивления нейтрального провода представлены блоком *RLC Branch*. Линия выполнена проводом А35, длина линии 0,4 км. Нагрузкой в фазах приемника служат блоки *RLC Branch* 1 – 3, параметры которых устанавливаются в соответствии с величиной и характером нагрузки.

Сигналы фазных напряжений с элементов *Voltage Measurement* 1 – 3 поступают на входы дифференциальных дискриминаторов ДД1 – ДД3 [92] (рисунок 3.5).

Дифференциальные дискриминаторы [92] объединены в подсистемы *Subsystem*, обозначенные на рисунке 3.4 ДД1 – ДД3.

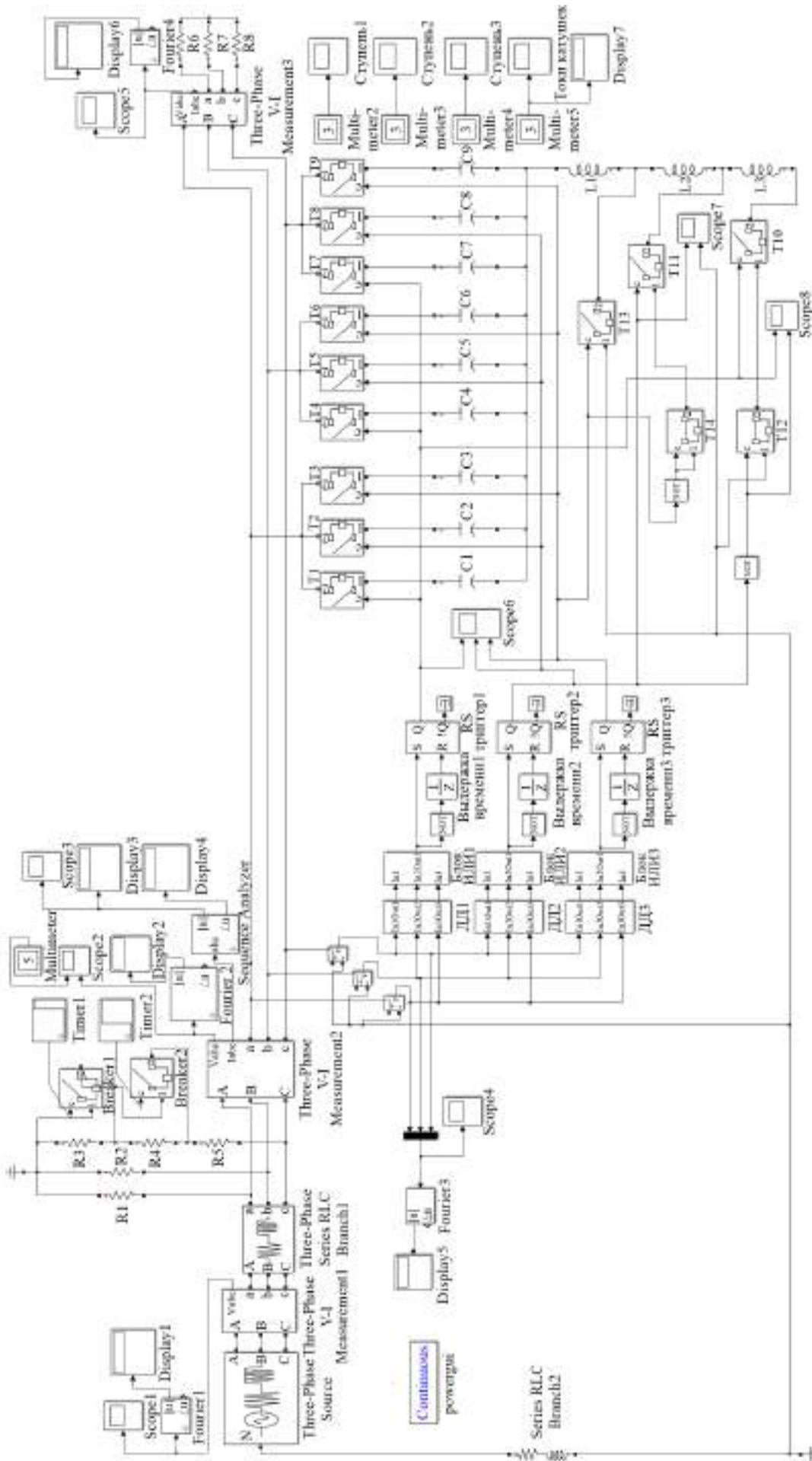


Рисунок 3.4 – Модель симметрирующего устройства [89,105,106]

Алгоритм их работы следующий. Для сравнения уровней фазных напряжений со значениями, регламентируемыми ГОСТ [28], элементы ДД1 – ДД3 построены на операторах сравнения *Relational Operator*, для определения верхнего и нижнего предела используются блоки *AC Voltage Source*. Для каждой из фаз установлены верхний и нижний пороги срабатывания с учетом разности начальных фаз трехфазной системы напряжений [92]. Для включения первой ступени СУ параметры заданы следующие: верхний предел срабатывания 209 В, который соответствует отклонению напряжения ≥ -5 от $U_{\text{НОМ}}$, нижний – 187 В, что соответствует отклонению напряжения ≥ -15 от $U_{\text{НОМ}}$, согласно блок схеме управления СУ.

Так как сигналы блоков *AC Voltage Source* представляют собой синусоидальную кривую, также как и кривые трехфазной синусоидальной ЭДС источника, возможно ложное срабатывание при пересечении кривых напряжения, поэтому для определения уровней напряжений необходимо рассматривать их модули. Для определения модулей этих напряжений применяются блоки *Fourier*, те же блоки применяются для определения модулей напряжений трехфазной сети, подключенных к выводам *In 1 – 3*. На рисунке 3.5 представлена структурная схема блоков ДД1 – ДД3.

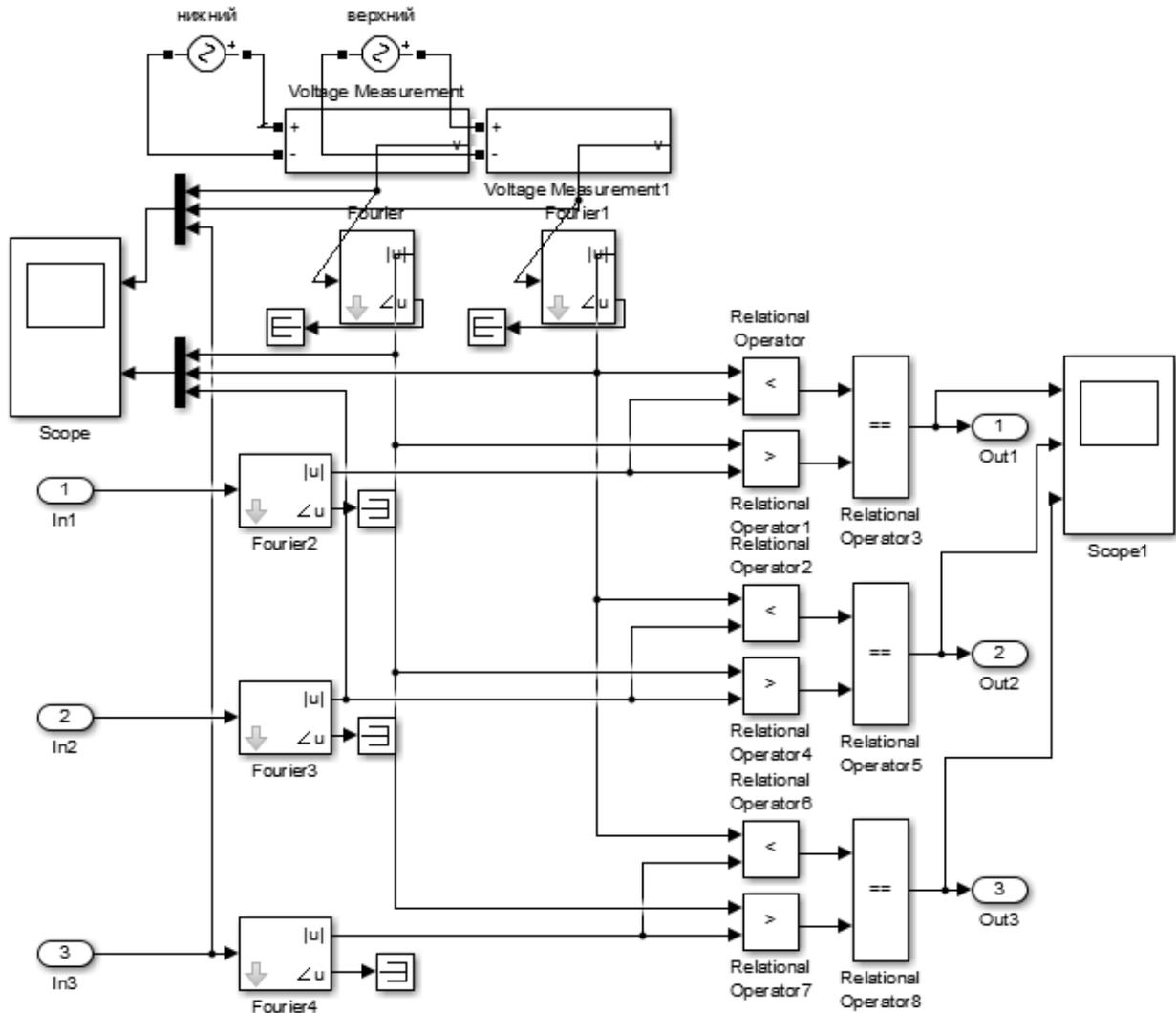


Рисунок 3.5 – Структурная схема блоков ДД1 – ДД3 [104]

Осциллограмма формы сигнала на выходе ДД представлена на рисунке 3.6 форма и уровень сигнала, полученного на выходе ДД, т.е. логическая единица, подтверждает возможность применения дифференциальных дискриминаторов для управления устройством в функции уровня несимметрии фазных напряжений.

Блоки ИЛИ 1 – 3 построены на трех логических элементах ИЛИ, объединенных с помощью функции *Subsystem*, и имеющие три входа и один выход. Содержание блоков ИЛИ 1 – 3 представлено на рисунке 3.7, алгоритм их работы описан ранее в п. 3.2.

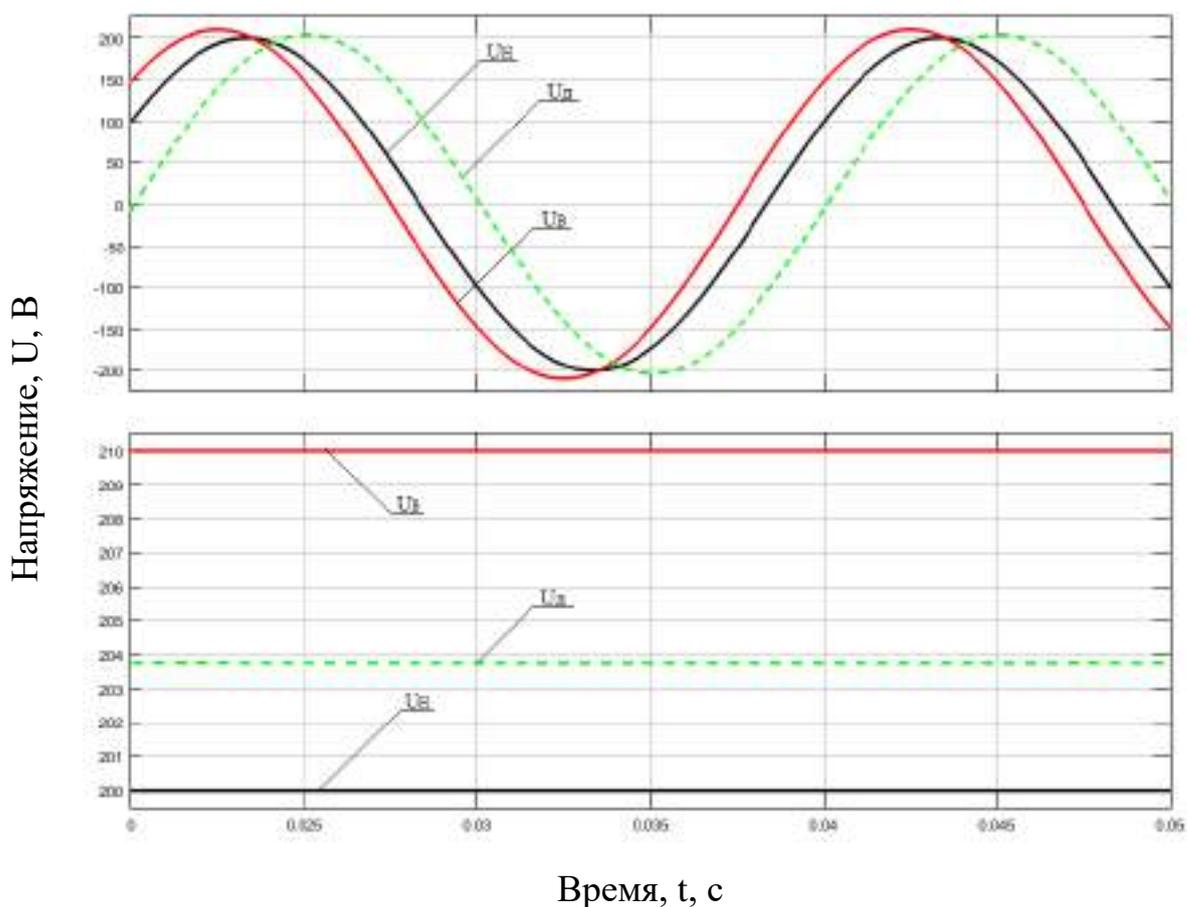


Рисунок 3.6 – Осциллограммы напряжений ДД1 – ДД3:
 U_B и U_H уровни верхнего и нижнего порогов срабатывания;
 U_D – действующее напряжение

Из рисунка 3.6 видны места пересечения синусоид, где происходят ложные срабатывания. Поэтому необходимо знать модули установленных пороговых значений и модули значений напряжений в каждой фазе в данный момент времени.

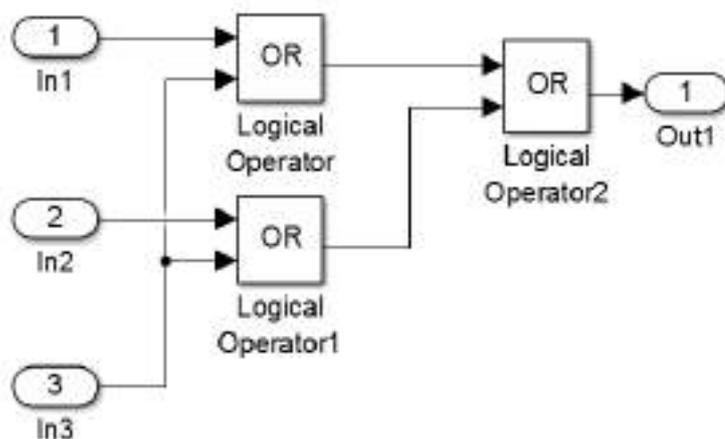


Рисунок 3.7 – Структурная схема блоков ИЛИ1 – ИЛИ3 [104]

Несимметричные режимы в сельских электрических сетях носят случайный характер. Поэтому в сельских электрических сетях симметрирующее устройство должно выполняться регулируемым. В связи с этим возникает необходимость правильного выбора коммутационной аппаратуры. Современная коммутационная аппаратура отвечает многим требованиям, однако, число переключений для механических коммутаторов ограничено ресурсом, заложенным заводом-производителем, поэтому в модели (и в последствие при реализации СУ в реальных условиях) предлагается использовать полупроводниковые тиристорные ключи, которые представлены блоками T1 – T14.

В условиях машинного эксперимента, для сокращения числа блоков схемы тиристорный ключ представлен блоком *Ideal Switch*, который представлен как резистор R_{on} [92], соединенные последовательно с переключателем (рисунок 3.8). Работой ключа управляет блок логики *Switch Logic*. Переключатель *SW* управляется логическим сигналом, который поступает на управляющий электрод *g*, при снижении управляющего сигнала до нуля - прибор выключается. Таким образом, происходит переключение ступеней регулируемого симметрирующего устройства [92].

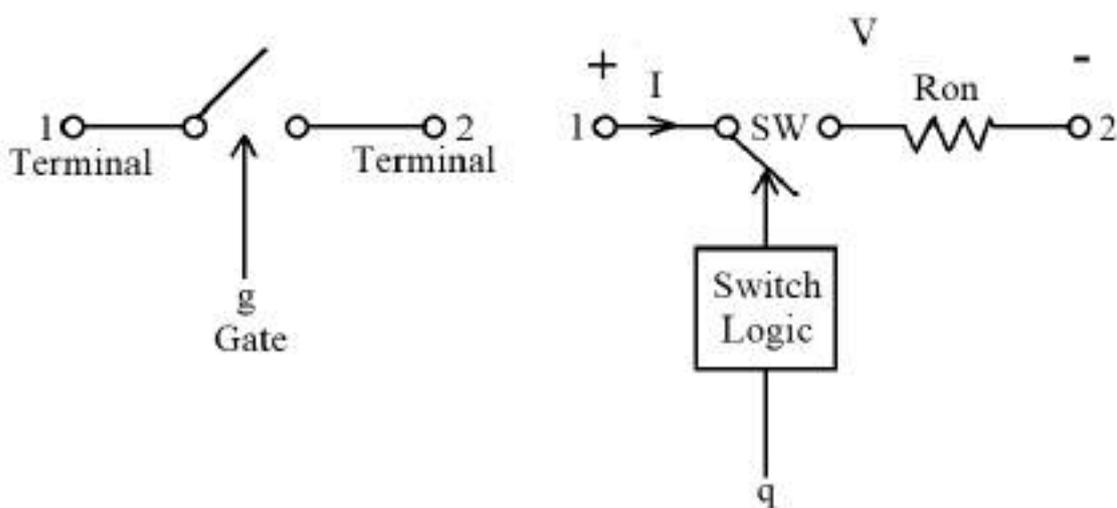


Рисунок 3.8 – Идеальный блок переключения [104]

Экспериментальное исследование работы СУ приводилось на виртуальной модели, описанной в п. 3.3. Схема состоит из трехфазного источника переменного

напряжения, ЛЭП, симметрирующего устройства, нагрузки, измерительных блоков приложения *Simulink (Matlab)*. Симметрирующее устройство подключалось в ближайшем к источнику *Three-Phase Source* узле нагрузок. При проведении эксперимента регистрировались следующие параметры: линейные и фазные напряжения, фазные токи, а также начальные фазы указанных токов и напряжений.

Несимметричные режимы работы сети создавались посредством изменения величины сопротивления и индуктивности блоков *RLC Branch*. Измерения напряжений, токов и начальных фаз величин проводились, начиная с симметричного режима работы сети, далее параметры блоков *RLC Branch* изменялись, тем самым осуществлялся переход к несимметричному режиму работы сети [107].

Измерения проводились для следующих режимов работы сети 0,4 кВ:

- сеть 0,4 кВ при отсутствии СУ;
- сеть 0,4 кВ при установке СУ в узле нагрузок при включении различных ступеней мощности устройства [107].

Параметры элементов исследуемой цепи приведены в таблицах 3.2 – 3.4.

Таблица 3.2 – Значения мощностей нагрузок при трехфазной симметричной и однофазной нагрузках

№ опыта	$P_A, \text{Вт}$	$P_B, \text{Вт}$	$P_C, \text{Вт}$	Коэффициент несимметрии
1	5700	5700	5700	1 (симметричная нагрузка)
2	6050	5700	5700	1,129
3	6500	5700	5700	1,283
4	6950	5700	5700	1,474
5	7500	5700	5700	1,71
6	8100	5700	5700	2,007
7	8800	5700	5700	2,389
8	9700	5700	5700	2,89
9	10800	5700	5700	3,571
10	12100	5700	5700	4,516
11	13900	5700	5700	5,889

Таблица 3.3 – Значения мощностей нагрузок при трехфазной симметричной и двухфазной нагрузках

№ опыта	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	Коэффициент несимметрии
1	5700	5700	5700	1 (симметричная нагрузка)
2	6050	6950	5700	1,388
3	6500	7500	5700	1,609
4	6950	8100	5700	1,653
5	7500	8800	5700	1,827
6	8100	9700	5700	2,04
7	8800	10800	5700	2,311
8	9700	12100	5700	2,656
9	10800	13900	5700	3,122
10	12100	16150	5700	3,776
11	13900	19400	5700	4,76

Таблица 3.4 – Значения мощностей нагрузок при трехфазной симметричной и трехфазной нагрузках

№ опыта	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	Коэффициент несимметрии
1	5700	5700	5700	1 (симметричная нагрузка)
2	6050	5900	6000	1,051
3	6500	6000	6300	1,109
4	6950	6150	6650	1,177
5	7500	6300	7050	1,257
6	8100	6500	7500	1,354
7	8800	6650	8000	1,472
8	9700	6850	8500	1,619
9	10800	7050	9200	1,808
10	12100	7250	9900	2,052
11	13900	7450	10800	2,384

Коэффициент несимметрии определяется следующим образом [11]:

$$K_{\text{НЕС}} = \frac{P_A}{P_{\text{макс.опыта}}} \div \frac{P_B}{P_{\text{макс.опыта}}} \div \frac{P_C}{P_{\text{макс.опыта}}} \quad (3.1)$$

где P_A, P_B, P_C – значения мощностей фаз потребителя; $P_{\text{макс.опыта}}$ – максимальное значение мощности нагрузки в опыте.

Выполнен расчет коэффициентов несимметрии токов и напряжений по обратной и нулевой последовательности и коэффициента потерь электрической энергии.

Таблица 3.5 – Результаты моделирования. Трехфазная симметричная и однофазная нагрузка (без СУ)

№ опыта Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U _a	210,3	209,3	208,2	206,9	205,4	203,7	201,8	199,5	196,7	193,4	189,2
U _b	210,3	210,7	211,1	211,5	212,1	212,6	213,3	214,1	215	216,2	217,6
U _c	210,4	210,5	210,6	210,8	210,9	211,2	211,4	211,8	212,2	212,7	213,3
φ_a	-0,9284	-1,015	-1,117	-1,229	-1,353	-1,505	-1,674	-1,877	-2,112	-2,406	-2,762
φ_b	-120,9	-121	-121,1	-121,2	-121,4	-121,5	-121,7	-121,9	-122,2	-122,5	-122,8
φ_c	119,1	119,2	119,4	119,5	119,7	119,9	120,2	120,5	120,8	121,2	121,7
I _a	26,27	27,69	29,27	31,07	33,11	35,46	38,18	41,39	45,2	49,82	55,53
I _b	26,27	26,31	26,35	26,4	26,46	26,53	26,61	26,7	26,81	26,93	21,1
I _c	26,27	26,28	26,3	26,32	26,34	26,36	26,39	26,43	26,48	26,53	26,61
I ₁	26,27	26,76	27,31	27,93	28,64	29,45	30,39	31,5	32,82	34,42	36,39
I ₂	0	0,4906	1,041	1,662	2,37	3,182	4,126	5,234	6,555	8,155	10,13
I ₀	0	0,4367	0,9265	1,48	2,11	2,833	3,673	4,66	5,836	7,261	9,022
φ_1	-0,923	-0,9416	-0,9655	-0,9961	-1,035	-1,085	-1,15	-1,235	-1,346	-1,493	-1,693
φ_2	-87,97	-2,161	-2,125	-2,2	-2,341	-2,435	-2,608	-2,826	-3,062	-3,339	-3,7
φ_0	76,24	-4,106	-4,205	-4,318	-4,448	-4,592	-4,763	-4,968	-5,207	-5,496	-5,856
U ₁	210,3	210,2	210	209,7	209,5	209,2	208,8	208,4	207,9	207,3	206,6
U ₂	0,01621	0,197	0,4119	0,6551	0,9347	1,249	1,619	2,057	2,575	3,2	3,976
U ₀	0	0,6845	1,452	2,319	3,307	4,441	5,758	7,304	9,147	11,38	14,14
φ_1	-0,923	-0,9402	-0,9593	-0,9807	-1,005	-1,032	-1,064	-1,1	-1,142	-1,192	-1,252
φ_2	-87,97	-157,5	-160,2	-161,1	-161	-162,1	-162,2	-162,2	-162,5	-163	-163,3
φ_0	-32,44	-164	-164,1	-164,2	-164,4	-164,5	-164,7	-164,9	-165,1	-165,4	-165,8
K _{2U}	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,015	0,019
K _{0U}	0	0,003	0,007	0,011	0,016	0,021	0,028	0,035	0,044	0,055	0,068
K _{2I}	0	0,018	0,038	0,06	0,083	0,108	0,136	0,166	0,2	0,237	0,278
K _{0I}	0	0,0016	0,034	0,053	0,074	0,096	0,121	0,148	0,178	0,211	0,248
K _p	1	1,001	1,006	1,015	1,029	1,049	1,077	1,115	1,166	1,234	1,323

Таблица 3.6 – Результаты моделирования. Трехфазная симметричная и однофазная нагрузка (При включении СУ).

№ опыта Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U _a	210,3	209,3	209,4	208,7	208	207,1	206,1	204,9	203,5	202,3	200,2
U _b	210,3	210,7	210,7	211	211,2	211,5	211,8	212,2	212,7	212,4	213
U _c	210,4	210,5	210	209,7	209,4	209,1	208,6	208,1	207,5	206,9	206,1
φ_a	-0,9284	-1,015	-1,213	-1,356	-1,513	-1,709	-1,929	-2,189	-2,502	-2,699	-3,149
φ_b	-120,9	-121	-120,9	-120,8	-120,8	-120,7	-120,6	-120,5	-120,4	-120,2	-120
φ_c	119,1	119,2	119,1	119,1	119,1	119,2	119,2	119,2	119,3	119,2	119,2
I _a	26,27	27,69	28,68	30,13	31,79	33,71	35,96	38,63	41,86	45,33	50,22
I _b	26,27	26,31	26,38	26,44	26,53	26,63	26,77	26,96	27,21	28,17	28,85
I _c	26,27	26,28	26,94	27,34	27,81	28,36	29,01	29,78	30,74	32,06	33,66
I ₁	26,27	26,76	27,33	27,96	28,68	29,51	30,49	31,65	33,05	34,8	36,98

I2	0	0,4906	1,047	1,677	2,4	3,236	4,216	5,379	6,783	8,534	10,72
I0	0	0,4367	0,4201	0,673	0,9629	1,299	1,962	2,159	2,722	2,891	3,633
φ_1	-0,923	-0,9416	0,08837	0,02847	-0,04481	-0,1348	-0,2467	-0,3885	-0,5701	-1,175	-1,452
φ_2	-87,97	-2,161	-2,278	-2,411	-2,589	-2,751	-2,942	-3,293	-3,48	-3,655	-4,105
φ_0	76,24	-4,106	43,16	43,02	42,86	42,67	42,45	42,19	41,87	45,87	45,42
U1	210,3	210,2	210	209,8	209,5	209,2	208,8	208,4	207,9	207,2	206,4
U2	0,01621	0,197	0,04145	0,6631	0,9498	1,278	1,66	2,115	2,66	3,347	4,207
U0	0	0,6845	0,6584	1,055	2,509	2,036	2,652	3,384	4,266	4,532	5,695
φ_1	-0,923	-0,9402	-1,01	-1,032	-1,056	-1,084	-1,116	-1,153	-1,196	-1,226	-1,289
φ_2	-87,97	-157,5	-160,3	-160,6	-160,6	-161,2	-162	-162,5	-163,2	-163,4	-163,8
φ_0	-32,44	-164	-116,8	-116,9	-117,1	-117,2	-117,5	-117,7	-118	-114	-114,5
K2U	0	0,001	0	0,003	0,005	0,006	0,008	0,01	0,013	0,016	0,02
K0U	0	0,003	0,003	0,005	0,012	0,01	0,013	0,016	0,021	0,022	0,028
K2I	0	0,018	0,038	0,06	0,084	0,11	0,138	0,17	0,205	0,245	0,29
K0I	0	0,0016	0,015	0,024	0,034	0,044	0,064	0,068	0,082	0,083	0,098
Kp	1	1,001	1,002	1,006	1,012	1,02	1,036	1,047	1,069	1,088	1,123

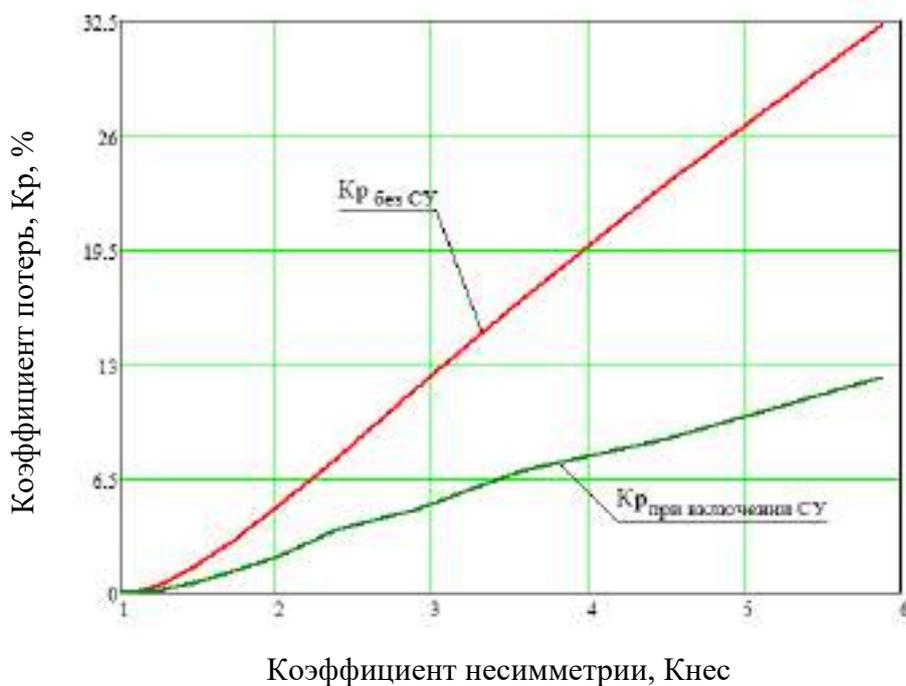


Рисунок 3.9 – График изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

Анализируя данные на рисунке 3.9 можно сделать вывод о том, что при режиме работы сети 0,4 кВ с установленным СУ в узле нагрузок на различных мощностях коэффициент потерь K_p , обусловленный несимметричной нагрузкой, снизился с 1,323 до величины 1,123 (20 %). Для данного опыта включение 3 ступени не осуществлялось.

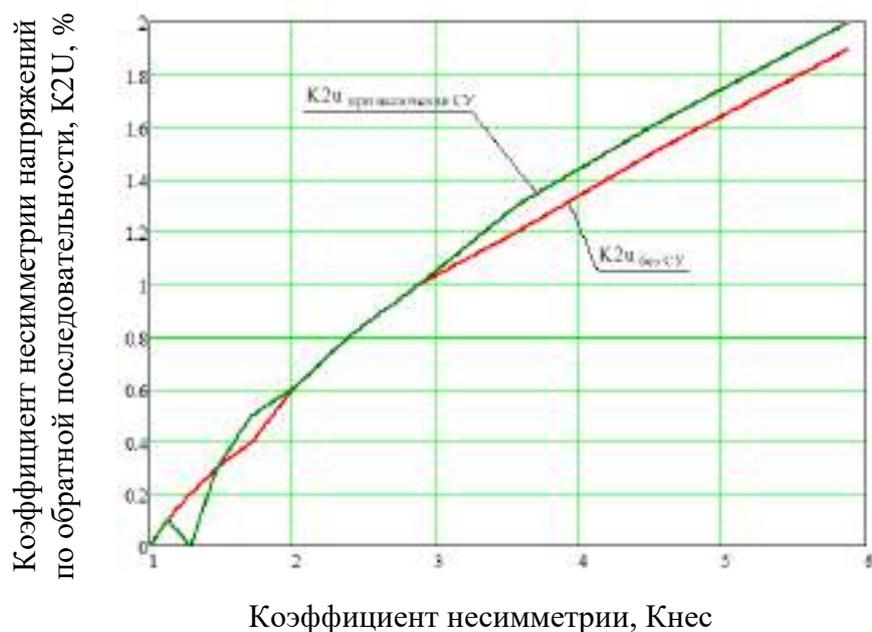


Рисунок 3.10 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

По рисунку 3.10 видно, что коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности имеет незначительное увеличение.

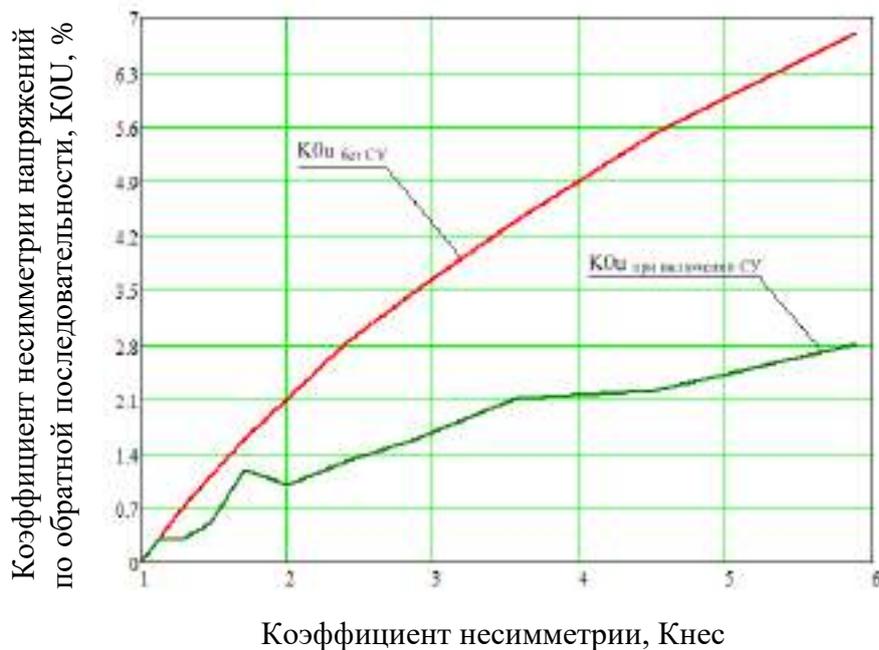


Рисунок 3.11 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

Коэффициент K_{0i} снизился с 0,068 до величины 0,028.

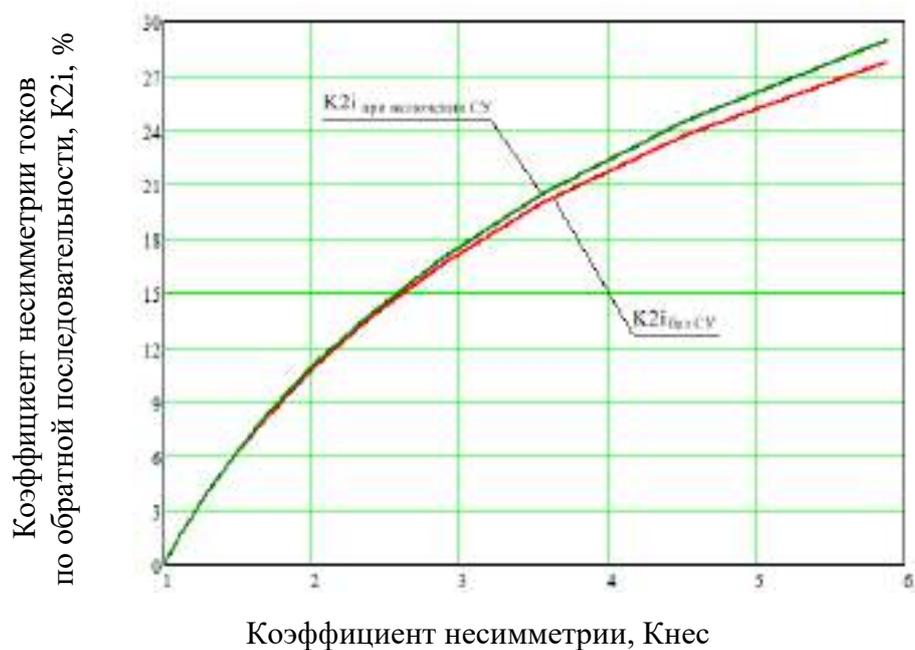


Рисунок 3.12 – График изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

Коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности имеет незначительное увеличение.

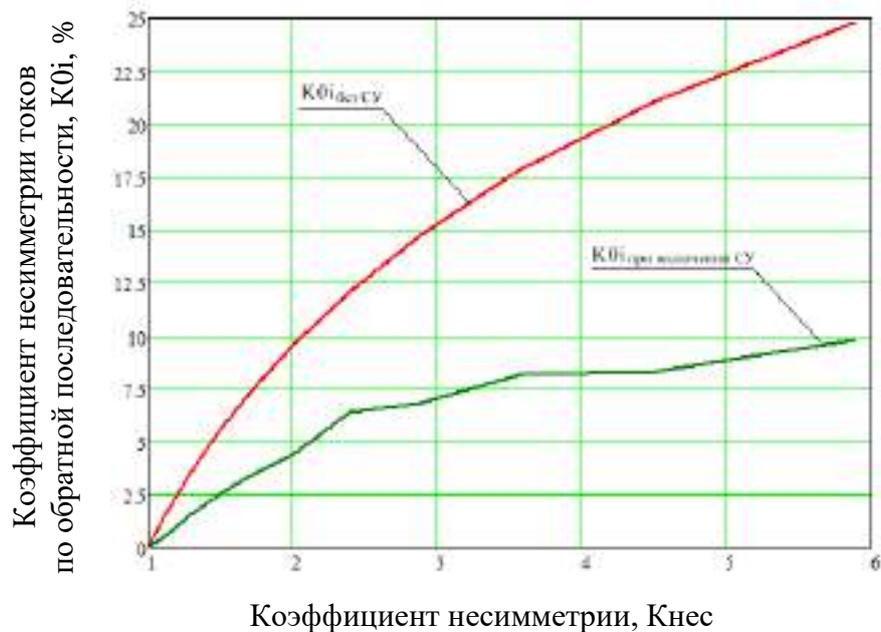
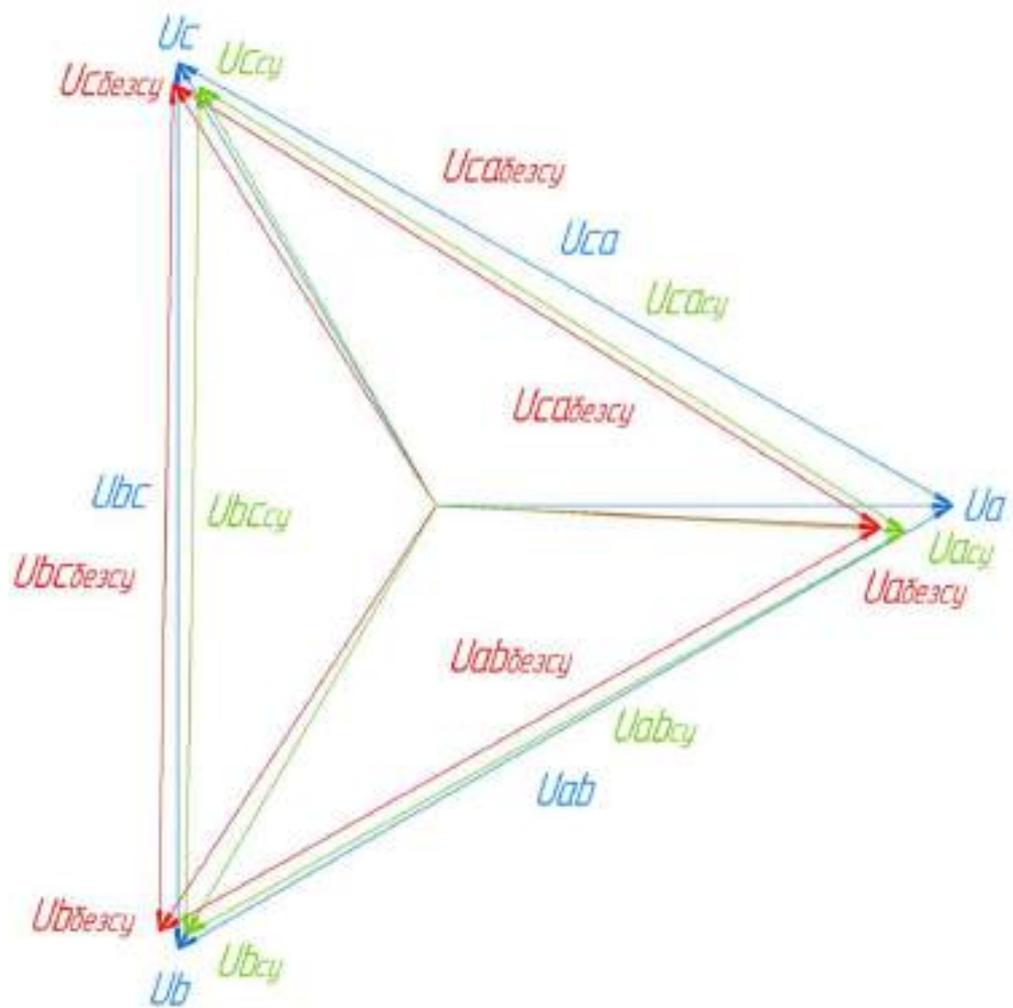


Рисунок 3.13 – График изменения коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

Коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности при включении СУ снизился с 0,248 значения до 0,098, что составляет 15 %.



- > Векторная диаграмма напряжений без включения СУ
- > Векторная диаграмма напряжений при включении СУ
- > Векторная диаграмма напряжений симметричной трехфазной сети

Рисунок 3.14 – Векторная диаграмма напряжений для максимального уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

На рисунке 3.14 представлены векторные диаграммы напряжений для опыта 2 при максимальном уровне несимметрии. Красным цветом фазные напряжения без включения симметрирующего устройства, зеленым – при включении СУ, синим цветом на рисунке представлена векторная диаграмма напряжений симметричной трехфазной сети.

Таблица 3.7 – Результаты моделирования. Трехфазная симметричная и двухфазная нагрузка (без СУ).

№ опыта / Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U _a	210,3	209,7	208,8	207,7	206,5	205,2	203,6	201,8	199,8	197,3	194,5
U _b	210,3	207,2	206,2	204,9	203,4	201,7	199,6	197	193,7	189,4	183,7
U _c	210,4	211,7	212,3	213	213,9	214,8	215,9	217,3	218,9	220,9	223,4
φ_a	-0,9284	-0,5771	-0,4873	-0,3847	-0,264	-0,1193	0,06277	0,2766	0,56	0,9172	1,404
φ_b	-120,9	-121,3	-121,5	-121,8	-122,1	-122,5	-122,9	-123,4	-124	-124,7	-125,6
φ_c	119,1	118,9	118,9	118,9	118,9	118,9	118,9	118,9	118,8	118,7	118,5
I _a	26,27	27,74	29,35	31,19	33,28	35,69	38,51	41,85	45,87	50,8	57,02
I _b	26,27	31,12	33,22	35,65	38,48	41,82	45,83	50,7	56,79	64,57	74,88
I _c	26,27	26,42	26,49	26,58	26,67	26,78	26,91	27,07	27,25	27,48	27,77
II	26,27	28,42	29,69	31,14	32,81	34,76	37,07	39,86	43,28	47,57	53,15
I ₂	0	1,485	2,082	2,811	3,691	4,745	6,029	7,612	9,613	12,21	15,73
I ₀	0	1,314	1,821	2,432	3,151	3,995	4,994	6,188	7,641	9,446	11,75
φ_1	-0,923	-1,01	-1,064	-1,13	-1,21	-1,309	-1,432	-1,587	-1,786	-2,046	-2,296
φ_2	-87,97	101	91,53	85,88	82,29	79,89	78,26	77,16	76,44	76,03	75,87
φ_0	76,24	-107,8	-98,72	-93,47	-90,32	-88,44	-87,42	-87,08	-87,32	-88,16	-89,69
U ₁	210,3	209,5	209,1	208,5	207,9	207,2	206,3	205,3	204	202,4	200,3
U ₂	0,01621	0,6006	0,8285	1,124	1,457	1,879	2,377	3,008	3,794	4,815	6,171
U ₀	0	2,059	2,854	3,812	4,938	6,262	7,827	9,7	11,98	14,81	18,42
φ_1	-0,923	-0,9982	-1,042	-1,092	-1,15	-1,216	-1,294	-1,387	-1,5	-1,64	-1,816
φ_2	-87,97	-59,8	-68,6	-74,26	-77,66	-80,04	-81,64	-82,75	-83,44	-83,85	-84
φ_0	-32,44	92,32	101,4	106,6	109,8	111,6	112,7	113	112,8	111,9	110,4
K _{2U}	0	0,003	0,004	0,005	0,007	0,009	0,012	0,015	0,019	0,024	0,031
K _{0U}	0	0,01	0,014	0,018	0,024	0,03	0,038	0,047	0,059	0,073	0,092
K _{2I}	0	0,052	0,07	0,09	0,112	0,137	0,163	0,191	0,222	0,259	0,296
K _{0I}	0	0,046	0,061	0,078	0,096	0,115	0,135	0,155	0,177	0,199	0,221
K _p	1	1,011	1,02	1,033	1,05	1,071	1,099	1,113	1,174	1,225	1,283

Таблица 3.8 – Результаты моделирования. Трехфазная симметричная и двухфазная нагрузка (При включении СУ).

№ опыта / Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U _a	210,3	209,2	208,3	207,3	206,2	204,9	203,3	201,9	199,7	197,7	194,3
U _b	210,3	208,9	208,3	207,6	206,9	205,9	204,8	203,5	201,7	199,5	196,2
U _c	210,4	210,8	210,8	210,8	210,8	210,9	211	210,3	210,3	209,6	209,6
φ_a	210,3	-1,024	-1,126	-1,236	-1,354	-1,498	-1,658	-1,962	-2,219	-2,725	-3,155
φ_b	210,3	-121,3	-121,4	-121,6	-121,7	-121,9	-122,2	-122,2	-122,6	-122,8	-123,4
φ_c	210,4	119,2	119,3	119,4	119,5	119,6	119,7	-1,962	-2,219	120,2	120,6
I _a	26,27	28,47	30,2	32,19	34,48	37,15	40,31	43,89	48,5	54,19	61,63
I _b	26,27	30,17	31,88	33,86	36,19	38,96	42,31	46,21	51,37	57,87	66,91
I _c	26,27	26,74	27,16	27,63	28,17	28,8	29,55	31,03	32,3	34,43	36,71
II	26,27	28,45	29,72	31,19	32,89	34,88	37,25	40,15	43,72	48,31	54,31

I2	0	1,493	2,092	2,816	3,685	4,728	5,992	7,525	9,479	11,98	15,41
I0	0	0,599	0,8357	1,124	1,469	1,88	2,377	2,534	3,185	3,534	4,534
$\varphi 1$	-0,923	-	-0,1091	-0,2307	-0,3725	-0,5399	-0,7407	-1,305	-1,57	-1,325	-1,858
		0,00365									
$\varphi 2$	-87,97	101,2	91,99	86,57	83,21	81,06	79,73	79,14	78,9	79,07	79,75
$\varphi 0$	76,24	-60,46	-51,47	-46,3	-43,23	-41,46	-40,58	-35,91	-36,31	-34,28	-36,05
U1	210,3	209,6	209,1	208,6	208	207,2	206,3	205,2	203,9	202,2	199,9
U2	0,01621	0,6121	0,8269	1,133	1,473	1,88	2,37	2,953	3,717	4,704	6,07
U0	0	0,939	1,31	1,762	2,302	2,947	3,726	3,971	4,993	5,539	7,106
$\varphi 1$	-0,923	-1,049	-1,093	-1,143	-1,201	-1,268	-1,347	-1,418	-1,534	-1,73	-1,914
$\varphi 2$	-87,97	-60,04	-68,05	-73,69	-76,88	-78,92	-80,2	-80,74	-80,97	-80,79	-80,15
$\varphi 0$	-32,44	139,6	148,6	153,8	156,8	158,6	159,5	164,2	163,8	165,8	164
K _{2U}	0	0,003	0,004	0,005	0,007	0,005	0,011	0,014	0,018	0,023	0,03
K _{0U}	0	0,004	0,006	0,008	0,011	0,014	0,018	0,019	0,024	0,027	0,036
K _{2I}	0	0,052	0,07	0,09	0,112	0,136	0,161	0,187	0,217	0,248	0,284
K _{0I}	0	0,021	0,028	0,036	0,045	0,054	0,064	0,063	0,073	0,073	0,083
K _p	1	1,005	1,008	1,013	1,021	1,03	1,042	1,051	1,068	1,083	1,108

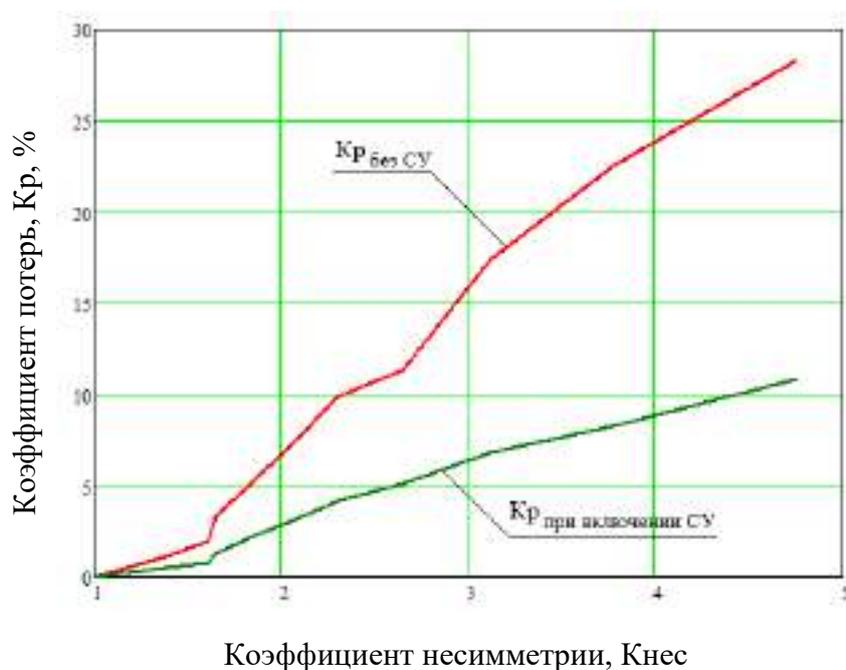


Рисунок 3.15 – График изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

Анализируя данные на рисунке 3.15 можно сделать вывод о том, что при режиме работы сети 0,4 кВ с установленным СУ в узле нагрузок на различных мощностях коэффициент потерь K_p , обусловленный несимметричной нагрузкой, снизился с 1,283 до величины 1,108 (17,5%).

Включение 1 ступени происходит при $K_{нес} = 1,388$. Включение 2 ступени происходит при $K_{нес} = 2,656$. Включение 3 ступени происходит при $K_{нес} = 3,122$.

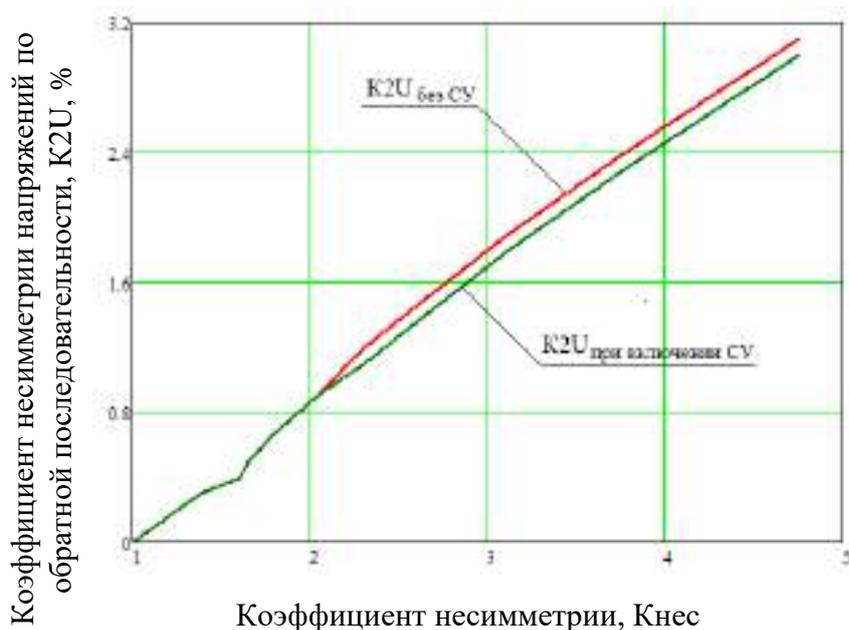


Рисунок 3.16 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

По рисунку 3.16 видно, что коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности снижается с 0,031 до 0,03.

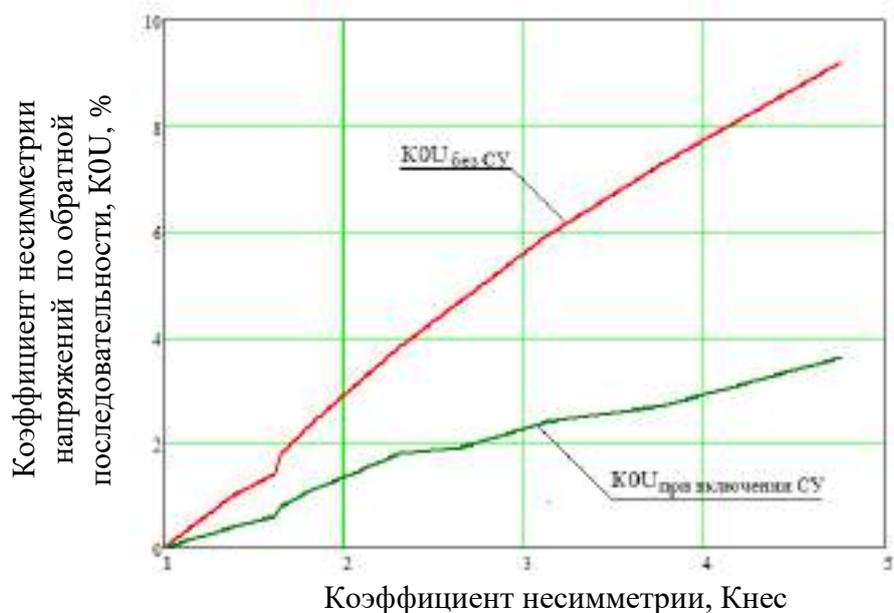


Рисунок 3.17 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

По графику видно, что коэффициент K_{0i} снизился с 0,092 до величины 0,036 при максимальном уровне несимметрии в эксперименте, т.е. на 5,6 %.

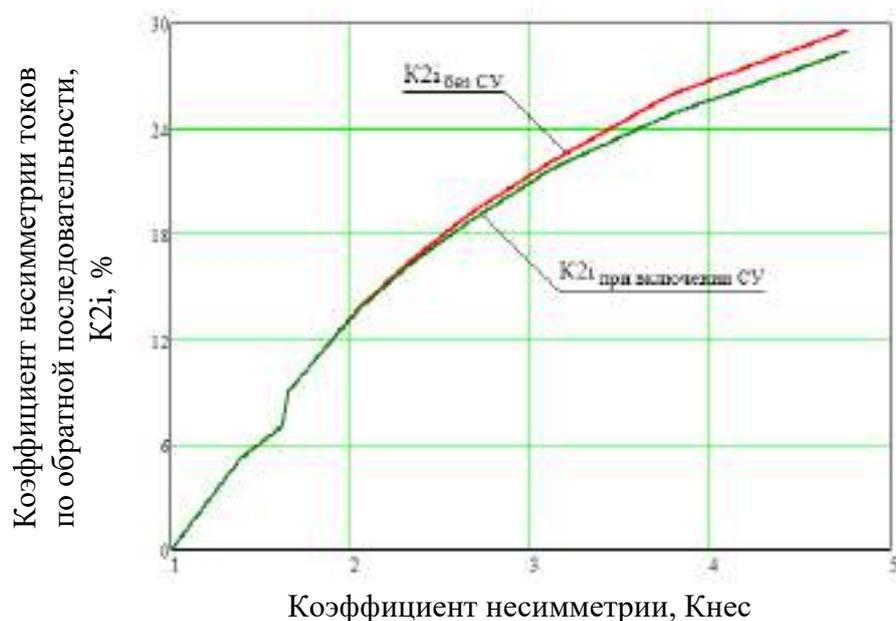


Рисунок 3.18 – График изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

K_{2i} снизился с 0,296 до величины 0,284 (1,2 %) при максимальном уровне несимметрии в эксперименте.

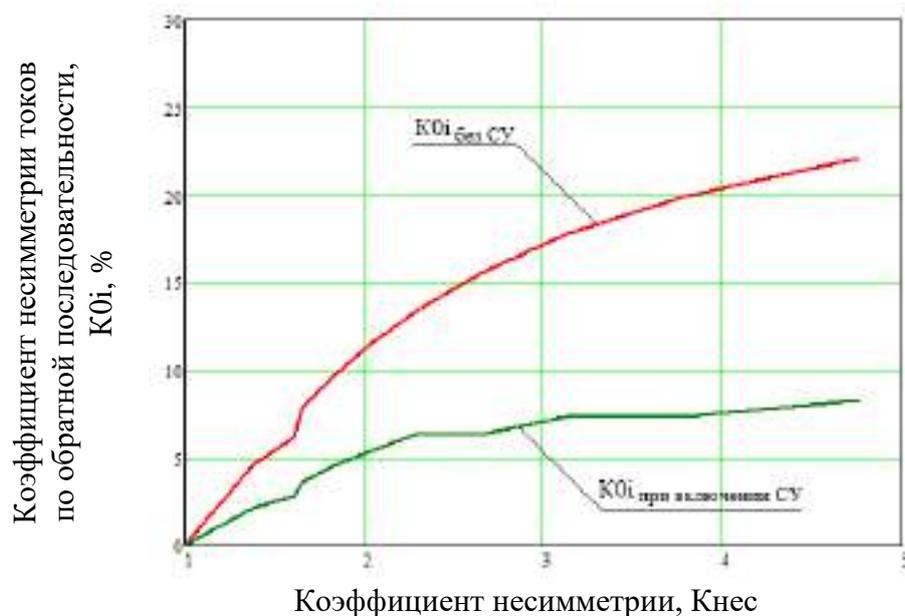
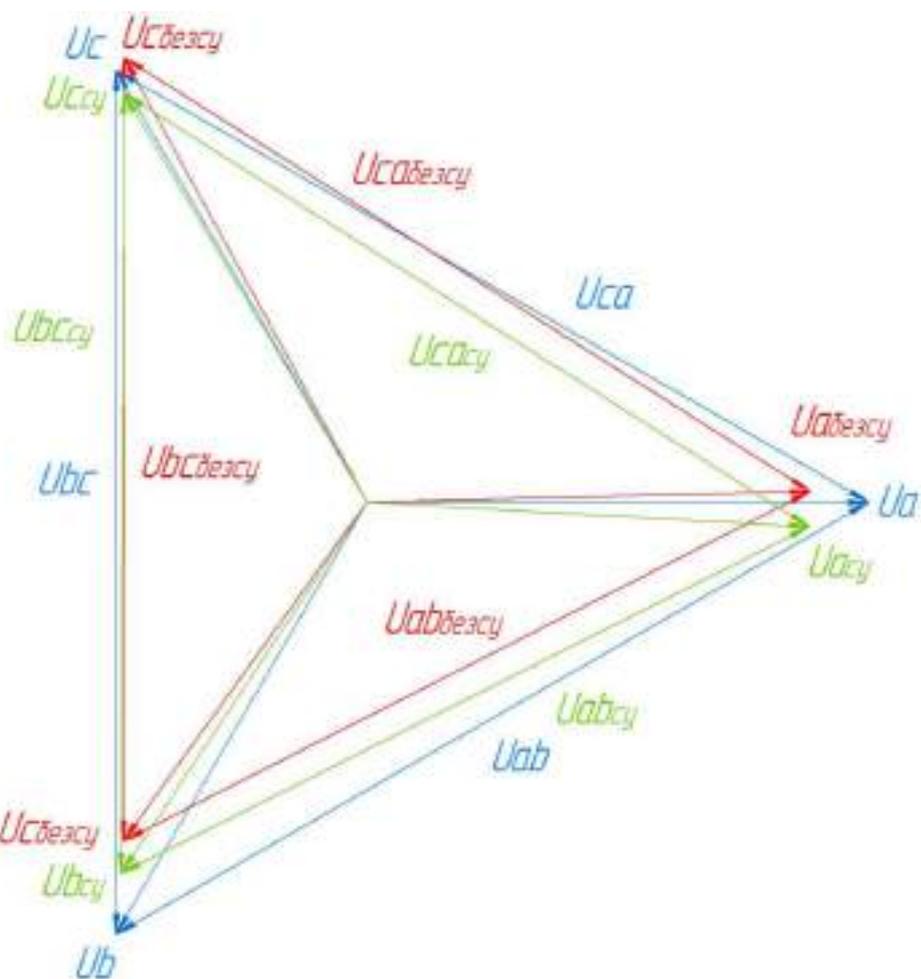


Рисунок 3.19 – График изменения коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

К0i снизился с 0,221 до величины 0,083 (13,8 %) при максимальном уровне несимметрии в эксперименте.



- Векторная диаграмма напряжений без включения СУ
- Векторная диаграмма напряжений при включении СУ
- Векторная диаграмма напряжений симметричной трехфазной сети

Рисунок 3.20 – Векторная диаграмма напряжений для максимального уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

Таблица 3.9 – Результаты моделирования. Трехфазная симметричная и трехфазная нагрузка (без СУ)

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ua	210,3	209,8	208,9	208	206,9	205,7	204,3	202,4	200,3	197,6	194,2
Ub	210,3	210,2	210,5	210,6	210,8	211	211,4	211,7	212,3	213	213,9
Uc	210,4	209,4	209,2	208,5	207,8	207	205,7	205,1	203,9	202,7	201,3
φa	26,27	-1,05	-1,166	-1,313	-1,481	-1,674	-1,93	-2,164	-2,488	-2,869	-3,348

φ_b	0	-120,9	-121	-121	121	-121,1	-121,1	-121,2	-121,3	-121,4	-121,6
φ_c	0	119	119,1	119,2	119,2	119,3	119,3	119,5	119,6	119,8	120,1
Ia	26,27	27,75	29,36	31,22	33,34	35,78	38,64	41,97	45,98	50,87	56,94
Ib	26,27	27,16	27,5	28,17	28,88	29,64	30,46	31,32	32,26	33,28	34,39
Ic	26,27	28,03	28,69	30,08	31,63	33,35	35,78	37,47	39,97	42,84	46,2
I1	26,27	27,64	28,52	29,82	31,28	32,92	34,96	36,92	39,4	42,32	45,83
I2	0	0,2728	0,5792	0,9508	1,392	1,923	2,6	3,361	4,351	5,611	7,244
I0	0	0,2407	0,5087	0,8279	1,203	1,647	2,199	2,818	3,6	4,57	5,797
φ_1	-0,923	-	-1,004	-1,052	-1,108	-1,173	-1,255	-1,338	-1,447	-1,583	-1,754
		0,9718									
φ_2	-87,97	-81,51	-41,98	-41,6	-41,08	-40,51	-43,71	-39,21	-38,49	-37,71	-36,83
φ_0	76,24	75,41	35,51	34,71	33,82	32,83	35,62	30,44	28,97	27,28	25,29
U1	210,3	209,8	209,5	209	208,5	207,9	207,1	206,4	205,5	204,4	203,1
U2	0,01621	0,1015	0,2252	0,3652	0,5378	0,7463	1,015	1,316	1,705	2,197	2,839
U0	0	0,3773	0,7974	1,298	1,886	2,582	3,447	4,416	5,642	7,162	9,086
φ_1	-0,923	-	-1,002	-1,048	-1,099	-1,156	-1,227	-1,295	-1,38	-1,48	-1,599
		0,9714									
φ_2	-87,97	120,3	159,3	161,3	161	161	157	161	161,7	162,6	163,3
φ_0	-32,44	-84,5	-124,4	-125,2	-126,1	-127,1	-124,3	-129,5	-130,9	-132,6	-134,6
K _{2U}	0	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,011	0,014
K _{0U}	0	0,002	0,004	0,006	0,009	0,012	0,017	0,021	0,027	0,035	0,045
K2I	0	0,01	0,02	0,032	0,045	0,058	0,074	0,091	0,11	0,133	0,158
K0I	0	0,009	0,018	0,028	0,038	0,05	0,063	0,076	0,91	0,108	0,126
Kp	1	1	1,002	1,004	1,008	1,013	1,021	1,032	1,046	1,064	1,089

Таблица 3.10 – Результаты моделирования. Трехфазная симметричная и трехфазная нагрузка (При включении СУ)

№ опыта Параметр	№ опыта										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ua	210,3	209,8	209,5	208,9	208,2	207,5	206,6	205,5	204,2	202,8	200,8
Ub	210,3	210,2	210	209,8	209,6	209,4	209,1	209	208,9	208,2	208
Uc	210,4	209,4	209,3	208,6	207,8	207	205,8	204,8	203,4	202,2	200,3
φ_a	26,27	-1,05	-1,134	-1,227	-1,339	-1,468	-1,617	-1,823	-2,064	-2,179	-2,528
φ_b	0	-120,9	-120,9	-120,9	-120,9	-120,9	-120,8	-120,7	-120,7	-120,6	-120,4
φ_c	0	119	118,9	118,9	118,8	118,7	118,6	118,5	118,4	118,2	118
Ia	26,27	27,75	28,99	30,61	32,45	34,56	37,04	39,93	43,41	47,44	52,7
Ib	26,27	27,16	27,77	28,59	29,48	30,45	31,6	32,64	33,91	35,75	37,49
Ic	26,27	28,03	28,84	30,34	32,01	33,9	36,45	38,51	41,38	44,61	48,65
I1	26,27	27,64	28,53	29,84	31,3	32,95	35,01	36,99	39,5	42,48	46,09
I2	0	0,2728	0,5794	0,9494	1,39	1,919	2,589	3,359	4,349	5,604	7,257
I0	0	0,2407	0,2321	0,3802	0,5564	0,768	1,036	1,34	1,732	1,894	2,446
φ_1	-0,923	-	0,002652	-	-0,2025	-0,3204	-0,4638	-0,6033	-0,7779	-1,296	-1,519
		0,9718		0,09549							
φ_2	-87,97	-81,51	-42	-41,41	-40,8	-40,05	-43,14	-38,46	-37,41	-36,16	-34,86
φ_0	76,24	75,41	82,82	81,96	81	79,92	82,61	77,32	75,71	78,37	76,21
U1	210,3	209,8	209,6	209,1	208,6	207,9	207,2	206,4	205,5	204,4	203
U2	0,01621	0,1015	0,223	0,3667	0,5385	0,7498	1,011	1,306	1,705	2,196	2,844

U0	0	0,3773	0,3638	0,5959	0,8722	1,204	1,624	2,1	2,715	2,968	3,834
φ_1	-0,923	-	-1,053	-1,098	-1,149	-1,207	-1,278	-1,345	-1,431	-1,508	-1,628
φ_2	-87,97	120,3	160,9	160,6	161,2	160,5	157,5	163	162,7	164	165,3
φ_0	-32,44	-84,5	-77,1	-77,95	-78,91	-79,99	-77,31	-82,59	-84,21	-81,54	-83,7
K _{2U}	0	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,011	0,014
K _{0U}	0	0,002	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,01	0,013	0,015	0,019
K _{2I}	0	0,01	0,02	0,032	0,045	0,058	0,074	0,091	0,11	0,132	0,157
K _{0I}	0	0,009	0,008	0,013	0,018	0,023	0,03	0,036	0,044	0,045	0,053
K _p	1	1	1,001	1,002	1,003	1,006	1,009	1,013	1,02	1,025	1,036

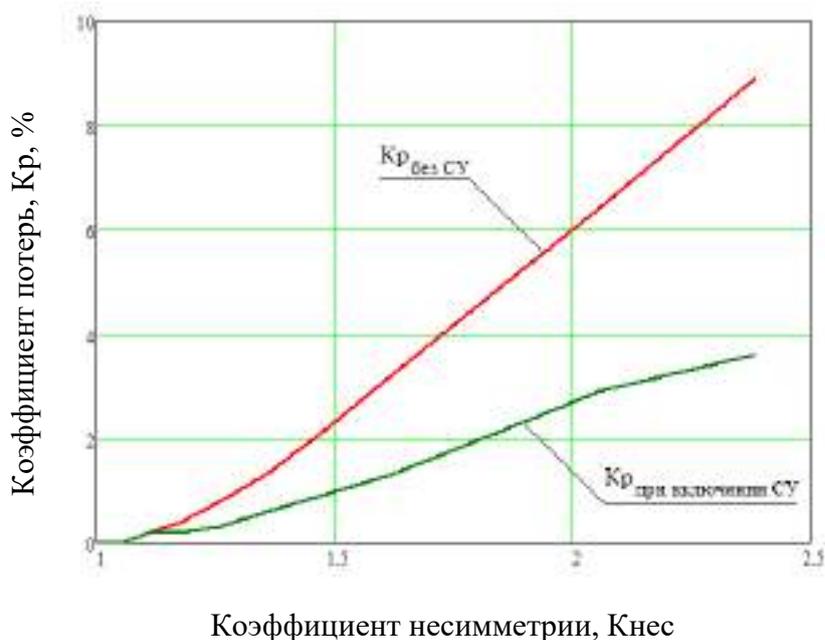


Рисунок 3.21 – График изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

Включение 1 ступени происходит при $K_{нес} = 1,109$.

Включение 2 ступени происходит при $K_{нес} = 2,052$.

Коэффициент потерь K_p , обусловленный несимметричной нагрузкой, снизился с 1,089 до величины 1,036 (5,3 %).

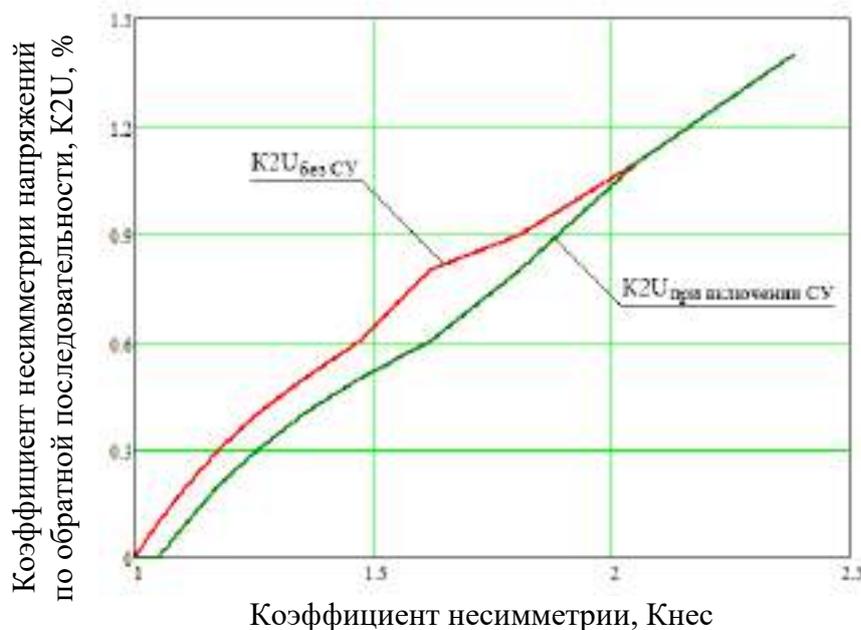


Рисунок 3.22 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

По рисунку 3.22 видно, что коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности по мере увеличения коэффициента несимметрии снижается, а при максимальном значении остается неизменным.

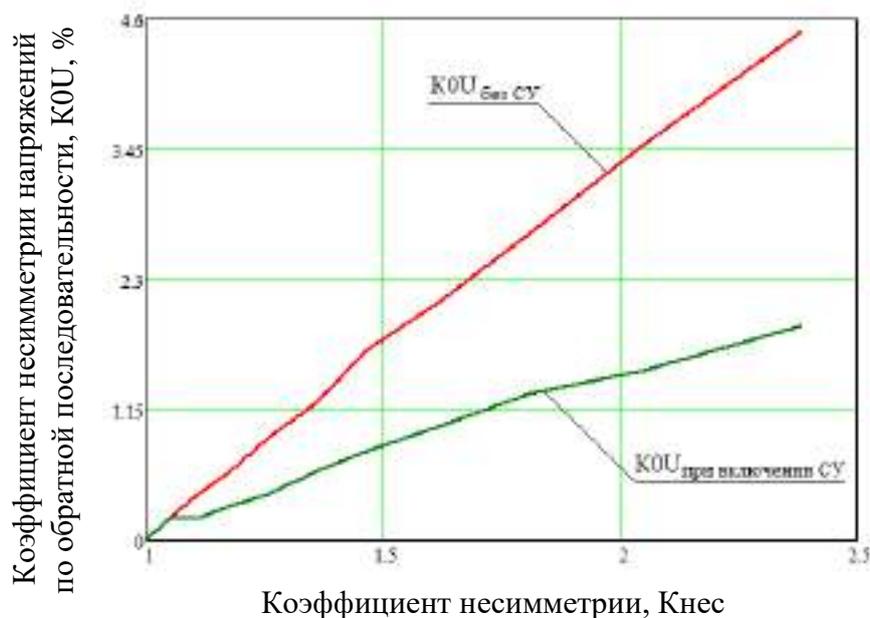


Рисунок 3.23 – График изменения коэффициента несимметрий напряжения по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

По графику видно, что коэффициент K_{0i} снизился с 0,045 до величины 0,019 (2,6 %) при максимальном уровне несимметрии в эксперименте.



Рисунок 3.24 – График изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

K_{2i} имеет незначительное снижение при максимальном уровне несимметрии в эксперименте.

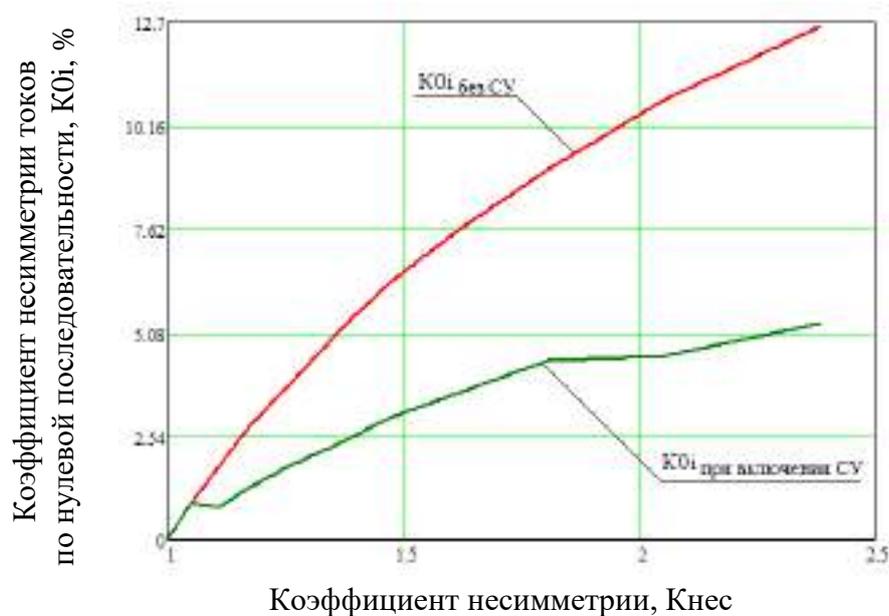
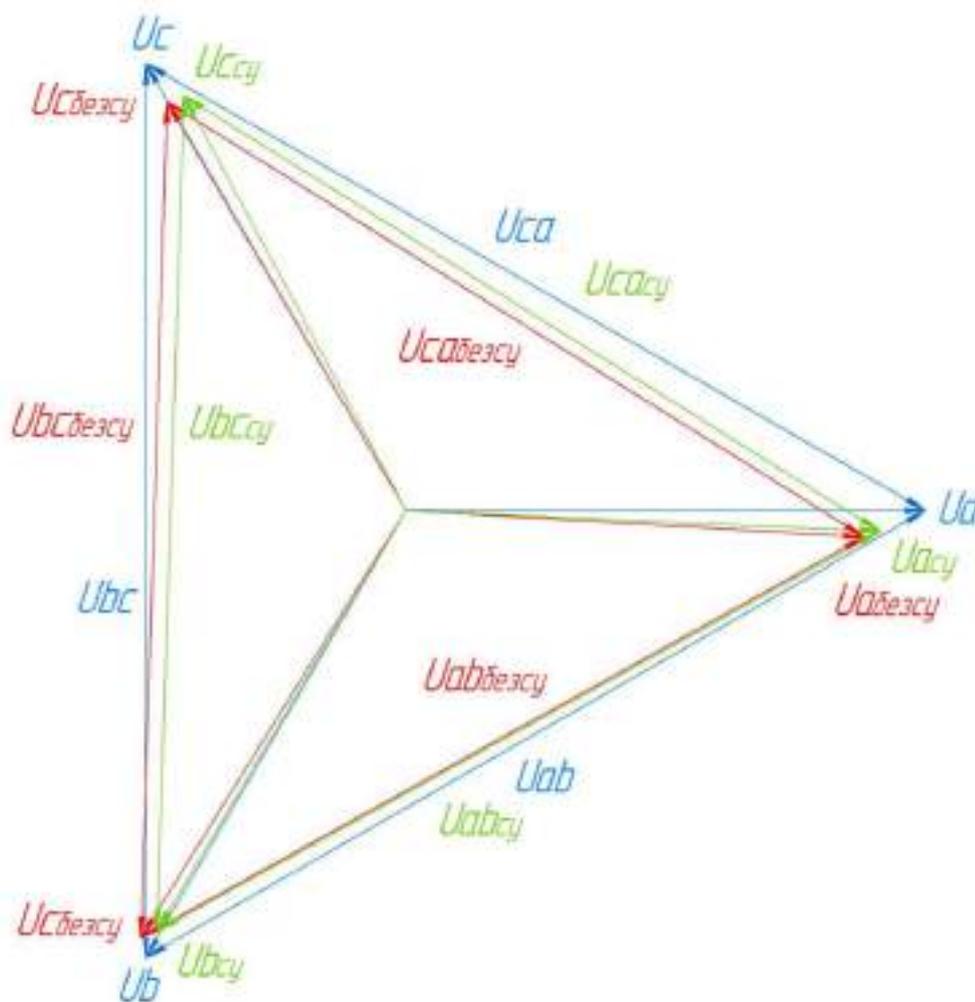


Рисунок 3.15 – График изменения коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

По графикам на рисунке 3.25 видно, что K_{0i} снизился с 0,126 до величины 0,053 при максимальном уровне несимметрии в эксперименте, т.е. на 7,3 %.



- Векторная диаграмма напряжений без включения СУ
- Векторная диаграмма напряжений при включении СУ
- Векторная диаграмма напряжений симметричной трехфазной сети

Рисунок 3.26– Векторная диаграмма напряжений для максимального уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

3.4 Определение рациональной конфигурации регулируемого симметрирующего устройства

С помощью программы RASPOT-1 [95] описанной в пункте 2.3 выполнен расчет потерь электрической энергии.

Анализ результатов имитационного моделирования несимметрии токов и напряжений в сельских электрических 0,4 кВ (п. 3.4) показал, что потери, обусловленные несимметричными режимами, могут превышать потери электрической энергии в симметричном режиме на 30 % [10], что приводит к дополнительным затратам на оплату электроэнергии, а так же к удорожанию производства продукции АПК. Применение регулируемого симметрирующего устройства позволяет нормализовать показатели качества электроэнергии и сократить ее потери.

Указанное возможно при рациональных параметрах СУ. Снижение потерь электрической энергии возможно при снижении токов нулевой последовательности, т.е. при минимальном сопротивлении СУ токам нулевой последовательности, таким образом, должны выполняться условия 2.17 – 2.20 [108].

Построим зависимости относительных потерь электроэнергии при включении СУ от коэффициента несимметрии $K_{нес}$ и величины индуктивности ступеней регулируемого СУ для трех опытов. Относительные потери определяются следующим выражением:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{нес} - \Delta P_{СУn}}{\Delta P_{нес}} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

где ΔP – относительные потери при включении n -й ступени СУ, %;

$\Delta P_{нес}$ – потери электроэнергии при несимметричном режиме, кВт·ч;

$\Delta P_{СУn}$ – потери электроэнергии при включении n -й ступени СУ, кВт·ч.

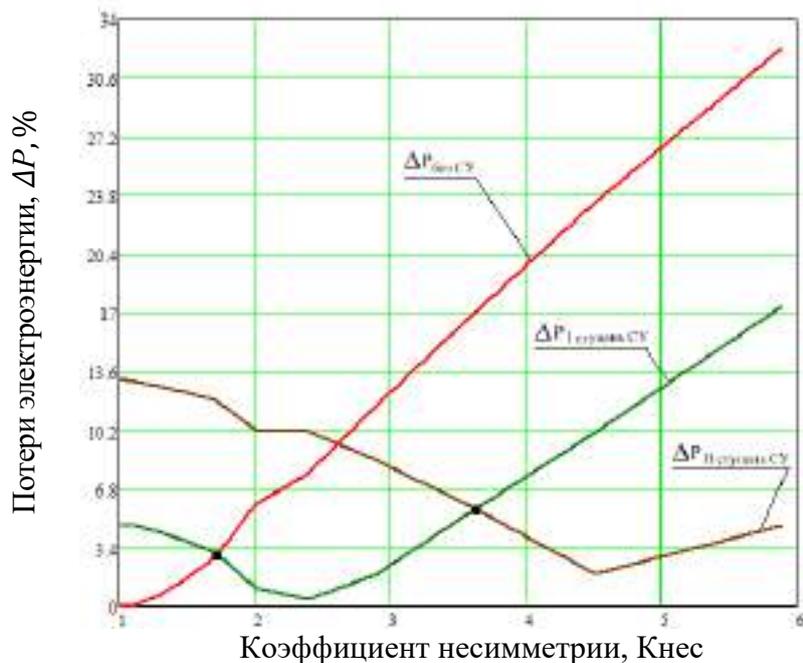


Рисунок 3.27 – Зависимость потерь электрической энергии при включении РСУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки)

На графиках рисунка 3.27 определены уровни снижения потерь при включении СУ на различные мощности. По полученным графикам можно сделать вывод о снижении потерь при включении СУ [18] при изменении коэффициента несимметрии $K_{нес} = 1 \dots 5,889$.

В условиях данного эксперимента потери электроэнергии возможно снизить на 21,5 % [18].

Также по графику рисунка 3.27 можно определить уровень несимметрии, при котором переключается СУ на более мощную ступень (момент переключений обозначен черной точкой), при этом выполняется условие сокращения потерь [18].

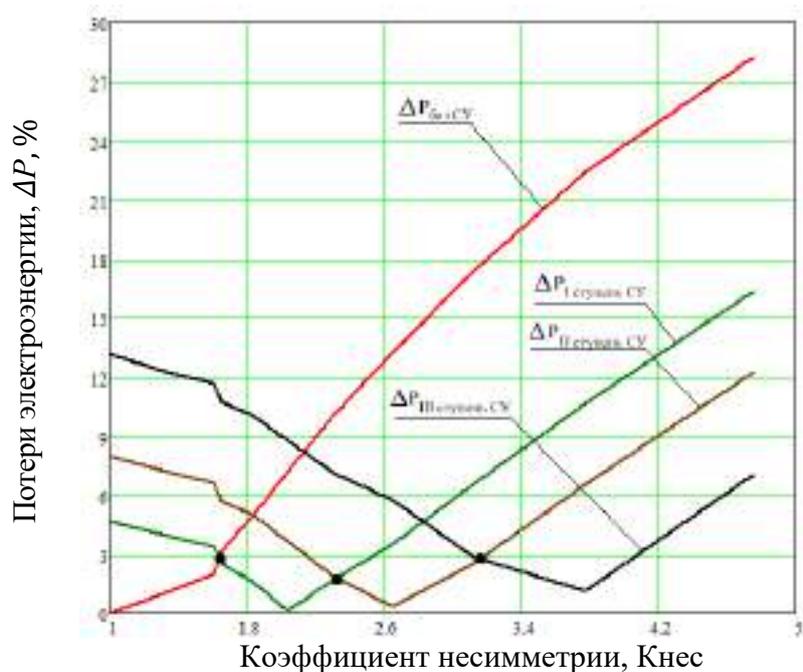


Рисунок 3.28 – Зависимость потерь электрической энергии при включении РСУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки)

Во втором опыте коэффициент несимметрии изменяется $K_{нес} = 1 \dots 4,76$, при этом для максимального уровня несимметрии потери снижаются на 20 %.

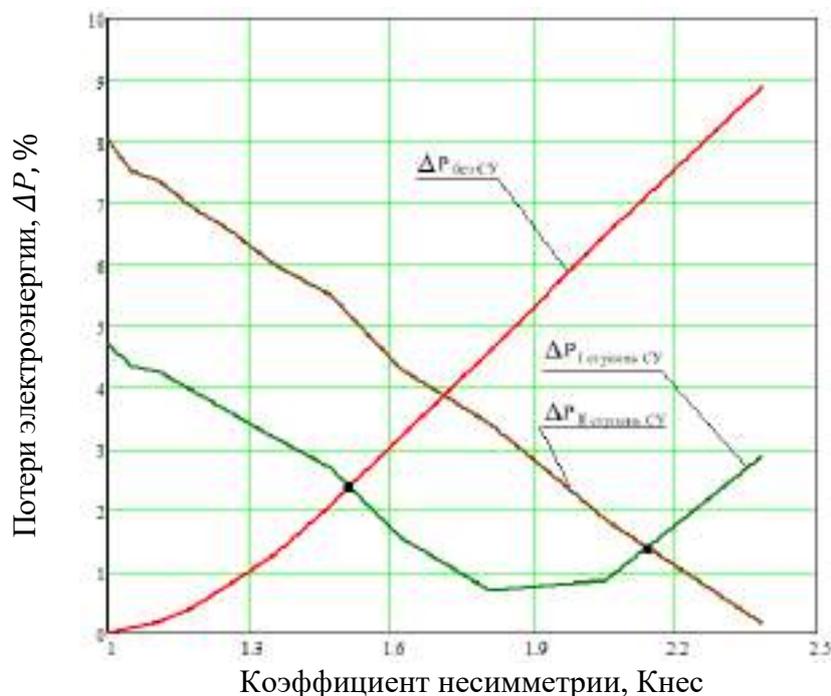


Рисунок 3.29 – Зависимость потерь электрической энергии при включении РСУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки)

При изменении нагрузки по каждой фазе (рис. 3.29) коэффициент несимметрии $K_{\text{нес}}$ изменяется от симметричной нагрузки $K_{\text{нес}} = 1$ до величины 2,384.

При включении СУ на различные мощности для максимального уровня несимметрии потери снизились на 6 % [18].

Определим рациональную зависимость $L(K_{\text{нес}})$. Для этого определим усредненные значения индуктивности от уровня несимметрии.

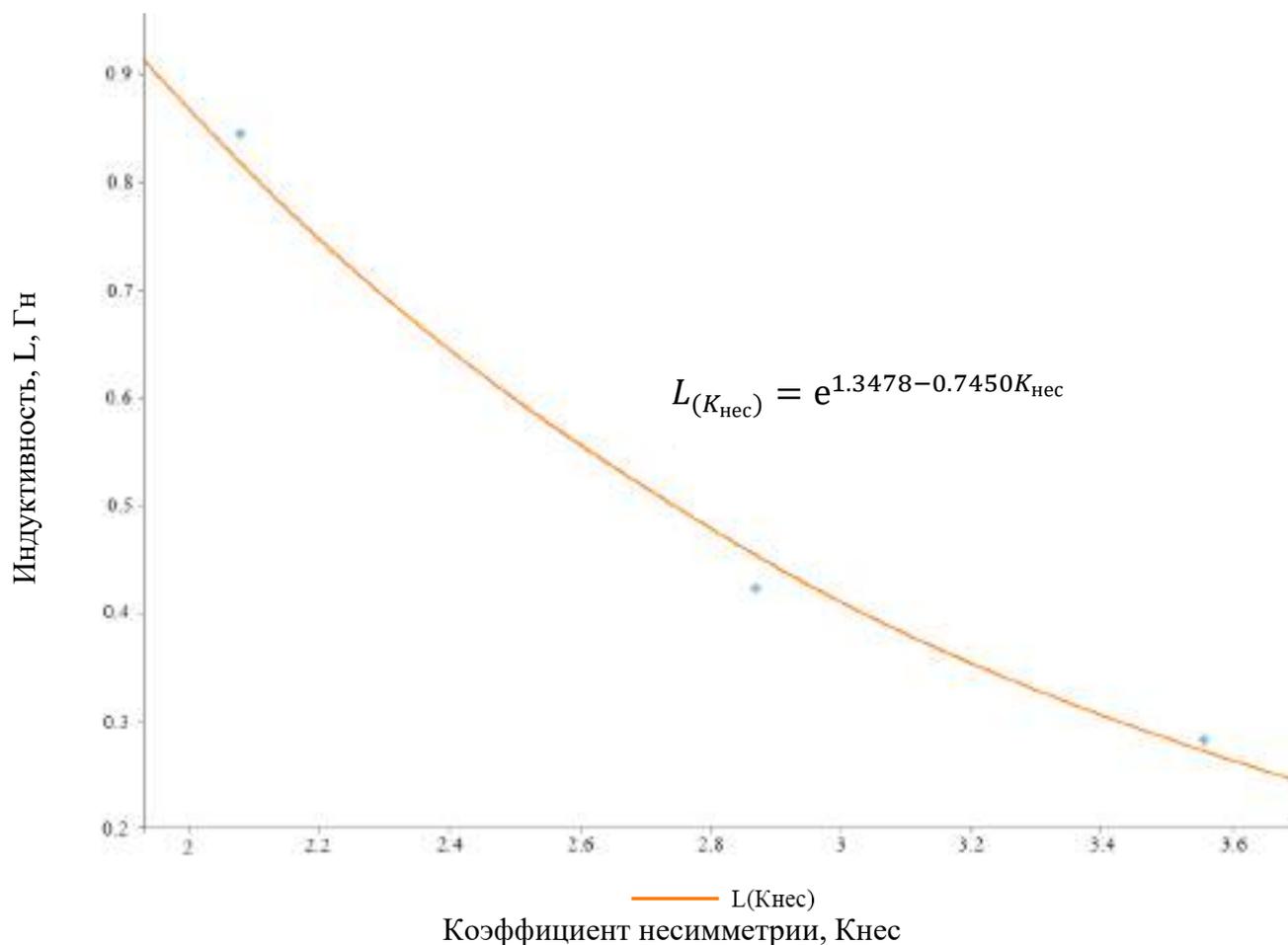


Рисунок 3.30 – Зависимость индуктивности СУ от уровня несимметрии

Определено уравнение зависимости индуктивности L симметрирующего устройства от уровня несимметрии $K_{\text{нес}}$:

$$L(K_{\text{нес}}) = e^{1.3478 - 0.7450 K_{\text{нес}}} \quad (3.3)$$

Таким образом для известного уровня несимметрии существует возможность определения рационального значения индуктивности L регулируемого симметрирующего устройства. Параметры емкостных элементов C

регулируемого симметрирующего устройства определяются в соответствии с выражением (2.20).

3.5 Разработка экспериментального образца регулируемого симметрирующего устройства

Подтверждающим фактором правильности и адекватности результатов исследований, проведенных с использованием имитационной модели, является физический эксперимент и разработка прототипа предложенного устройства. Создание полноценного прототипа и проведение экспериментальных исследований позволяют в достаточной мере оценить целесообразность применения регулируемого симметрирующего устройства.

Расчёт регулируемого симметрирующего устройства для физической модели сети 0,4 кВ проведён в соответствии с пунктом 2.4. На основе проведённых расчётов создана физическая модель СУ, представленная на рисунке 3.31

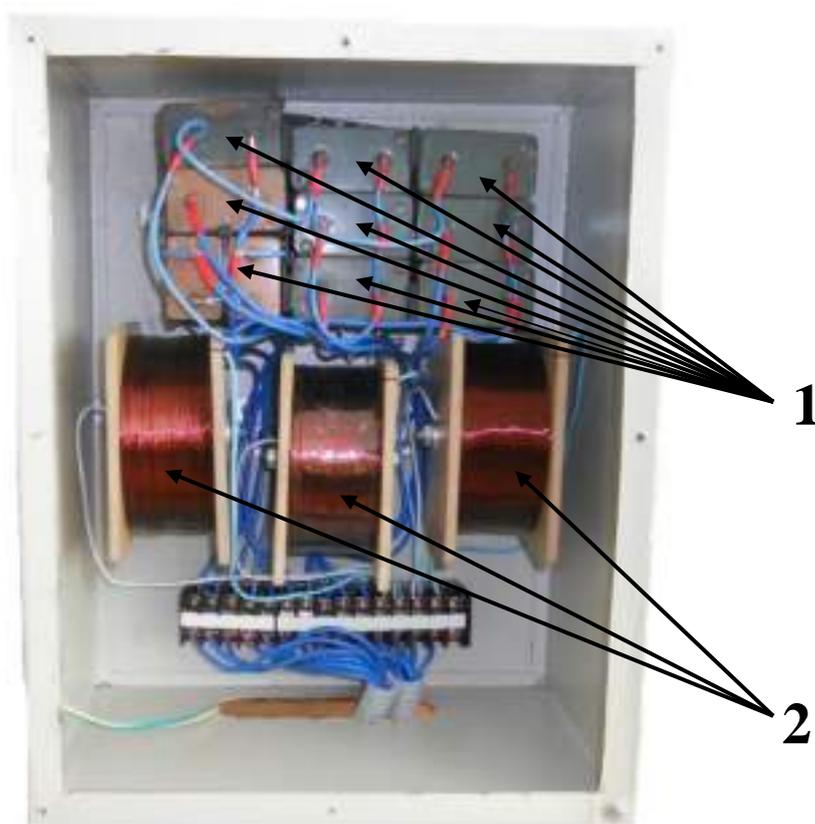


Рисунок 3.31 – Модель симметрирующего устройства: 1 – конденсаторы; 2 – индуктивные катушки

Индуктивные катушки на квадратном сердечнике 20*20*50 мм выполнены проводом ПЭТВ – 2 0,93 мм с количеством витков 3371 и обладают каждая следующими параметрами: индуктивность $L = 0,282$ Гн, сопротивление постоянному току $R = 19,313$ Ом, металлизированные бумажные герметизированные однослойные конденсаторы МБГО –1 4 мкФ 400 В.

Блок управления (рисунок 3.29) состоит из трех цифровых датчиков переменного напряжения ZMPT101В (рисунок 3.30) и четырех ACS712 датчиков тока с гальванической развязкой 20А (рисунок 3.31), четырех понижающих реле напряжения, GSM модуль SIM900R с сим-картой (рисунок 3.34) и аппаратной платформы на базе микроконтроллера ATmega328 (платформа Arduino) [109].

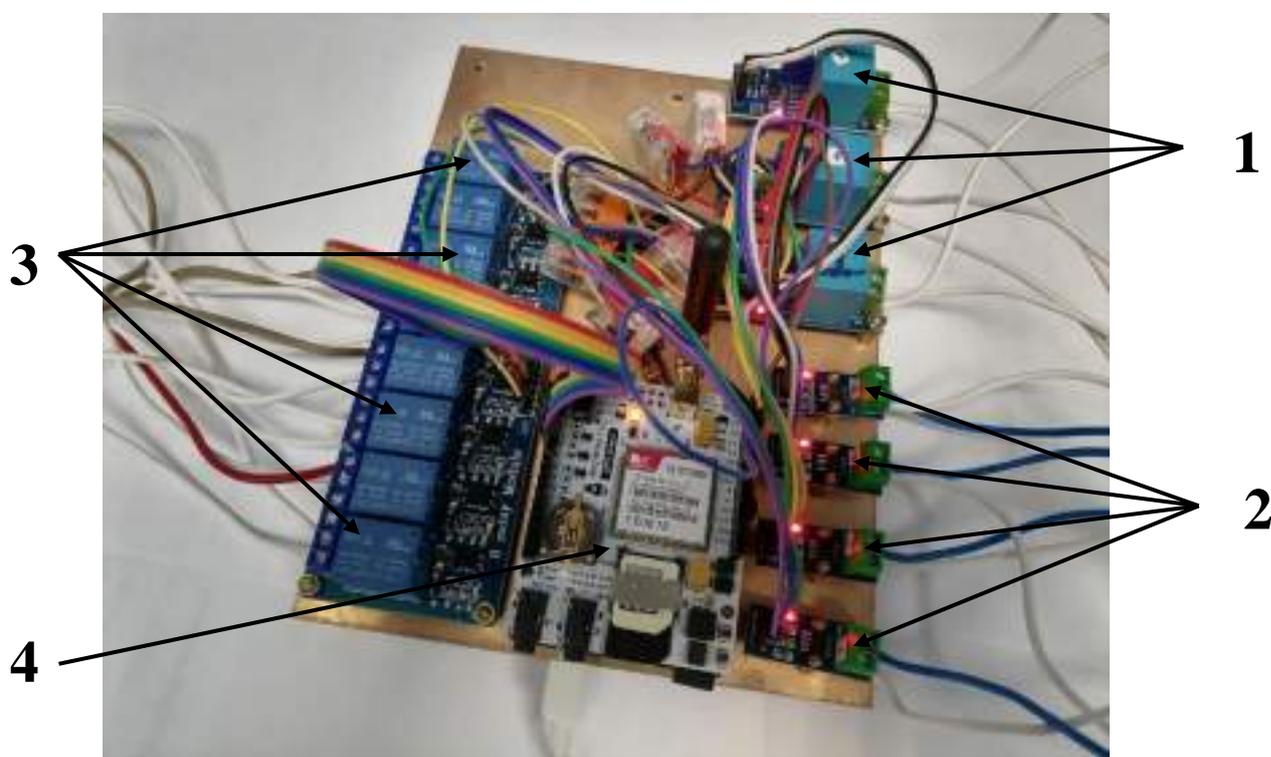
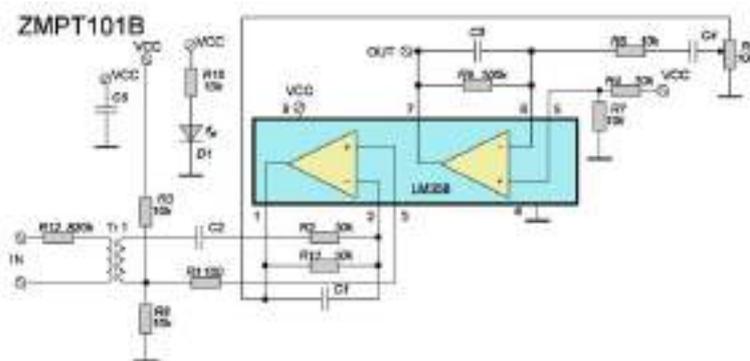


Рисунок 3.32 – Блок управления [109]: 1 – цифровые датчики переменного напряжения; 2 – датчики тока; 3 – реле напряжения; 4 – GSM модуль с сим-картой

Платформа имеет 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки.



а



б

Рисунок 3.30 – Датчик переменного напряжения ZMPT101B [110] : а – модуль датчика напряжения ZMPT101B; б – расположение выводов интегрального датчика ZMPT101B

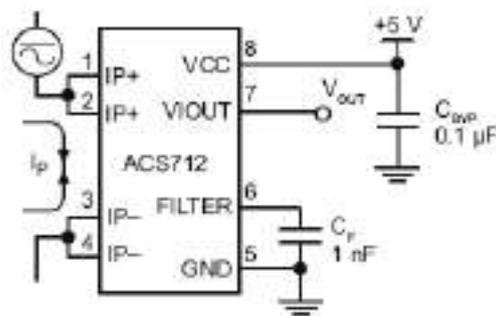
При помощи датчика ZMPT101B можно измерять переменное напряжение в бытовой сети 220В и безопасно передавать показания на вход любого микроконтроллера с встроенным АЦП [109]. Arduino модуль измерения напряжения, основан на маломощном трансформаторе. За счет, которого показания не искажаются и полностью повторяют форму сигнала на выходе сенсора. Датчик безопасен, так как имеет гальваническую развязку от высоковольтного входа. Для калибровки показаний измеряемого напряжения, на модуле есть подстроечный резистор, при помощи которого можно довольно точно подстроить показания. Учитывая стоимость датчика, на сегодняшний день аналогов ему нет.

Таблица 3.11 - Характеристики Arduino модуля ZMPT101B [110]

Характеристика	Значение
Измеряемое напряжение	0 - 1000 В
Напряжение изоляции	4000 В
Ток обмоток	2 мА
Напряжение питания	4 .. 12 В
Индикация питания	светодиод
Рабочая температура	-40 .. +70°C
Размеры платы	49,5 x 19.4 мм



а



б

Рисунок 3.33 – ACS712 Датчик тока с гальванической развязкой 20 А [110]: а – модуль датчика тока ACS712; б – расположение выводов интегрального датчика ACS712

ACS712 Датчик тока с гальванической развязкой 20 А, без использования шунта, основан на эффекте Холла, поэтому вблизи модуля не рекомендуется устанавливать мощные магниты, соленоиды, реле, электромоторы и прочие предметы излучающие магнитное поле, так как оно может исказить показания. Датчик ACS712 может измерять переменный и постоянный ток. Датчик питается от напряжения +5 В. Микросхема ACS712 имеет вывод, к которому подключен фильтрующий конденсатор, что позволяет уменьшить шумовые характеристики и увеличить точность измерения.

Таблица 3.12 - Характеристики Arduino модуля ACS712 20А [110]

Характеристика	Значение
Максимальный измеряемый ток	20А
Чувствительность	100 мВ/А
Температурный диапазон	-40 .. +85°C
Ток потребления не превышает	11 мА
Сопротивление внутреннего шунта	1,2 МОм
Гальваническая развязка, пробивное напряжение	2,1 кВ
Размер	31 x 13 мм

Так же имеет низкое сопротивление измерительного шунта, а значит незначительные потери. Реле тока и напряжения заведены на аналоговые выходы платы (микроконтроллера). Понижающие реле напряжения подключены на цифровые выходы микроконтроллера. Подключение осуществляется через

понижающие реле напряжения, которые преобразуют входное напряжение с 220В до 30В и подключаются к кнопочному посту. Для работы платформа подключается к компьютеру посредством кабеля USB, можно так же подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

Модульность Arduino позволяет создавать на базе этой платформы проекты различной направленности и функциональности. Существует возможность объединения платы и модулей связи практически любого стандарта и протокола, в частности, для подключения к сотовой сети [109].



Рисунок 3.34 – GSM модуль SIM900R [109]

Таблица 3.13 - Характеристики GSM модуля SIM900R [110]

Характеристика	Значение
Диапазон рабочей частоты	GSM 900 / 1800 МГц
Класс передачи данных GPRS	multi-slotclass 10/8
CSD	до 14.4 кбит/с
Встроенный стек	TCP/IP, UDP/IP
Напряжение питания	3,2 ... 4,8 В
Рабочий температурный диапазон:	-30 °С ... +80 °С
Размер	24* 24 * 3 мм

GSM модуль SIM900R (рисунок 3.34) для Arduino позволяет осуществлять соединения с любым удаленным устройством посредством мобильной сети – везде, где есть покрытие. Это позволяет удаленно управлять симметрирующим

устройством, отправлять команды управления на устройство и принимать информацию от него с помощью SMS-команд или через интернет-подключение по GSM/GPRS, а так же получать необходимые данные и контролировать состояние СУ и управлять его работой [109].

3.6 Выводы по главе 3

1. Представлена схема управления регулируемого симметрирующего устройства и принцип её действия;

2. Проведено имитационное моделирование работы регулируемого симметрирующего устройства в сети 0,4кВ в пакете MatLab (Simulink), в результате которого определена возможность реализации СУ и его алгоритма работы. СУ позволяет снизить K_p на 21%, а так же снизить K_{2U} и K_{0U} . Имитационное моделирование так же показало, что СУ обеспечивает симметрирование напряжений.

3. Определена зависимость параметров регулируемого симметрирующего устройства от уровня несимметрии и из условия минимума потерь электрической энергии $L_{(K_{\text{нес}})} = e^{1.3478 - 0.7450K_{\text{нес}}}$.

4. Разработан экспериментальный образец регулируемого симметрирующего устройства, состоящий из трех ступеней мощности и включающее в себя три индуктивные катушки индуктивностью $L = 0,282$ Гн, а так же девять конденсаторов МБГО –1 4 мкФ 400 В;

5. Разработана система управления СУ на базе Arduino, которая позволяет автоматически включать и отключать ступени мощности в зависимости от значений отклонений напряжений в каждой из фаз. Возможность вывода информации на монитор компьютера упрощает мониторинг текущих показателей параметров исследуемой сети, а GSM модуль позволяет удаленно управлять симметрирующим устройством, отправлять команды управления на устройство и принимать информацию от него с помощью SMS-команд или через интернет-подключение по GSM/GPRS, а так же получать необходимые данные и контролировать состояние СУ и управлять его работой.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

4.1. Разработка и описание экспериментальной установки.

Для экспериментального исследования несимметричных режимов работы сельских электрических сетей 0,4 кВ, а также уровня потерь и показателей качества электрической энергии на кафедре «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ была разработана экспериментальная установка, представляющая собой модель трехфазной сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством.

Разработка и монтаж экспериментальной установки осуществлялись современными материалами и инструментами с учетом действующих нормативных документов в области охраны труда и эксплуатации электроустановок [97].

Электрическая схема экспериментальной установки показана на рисунке 4.1.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 4.2.

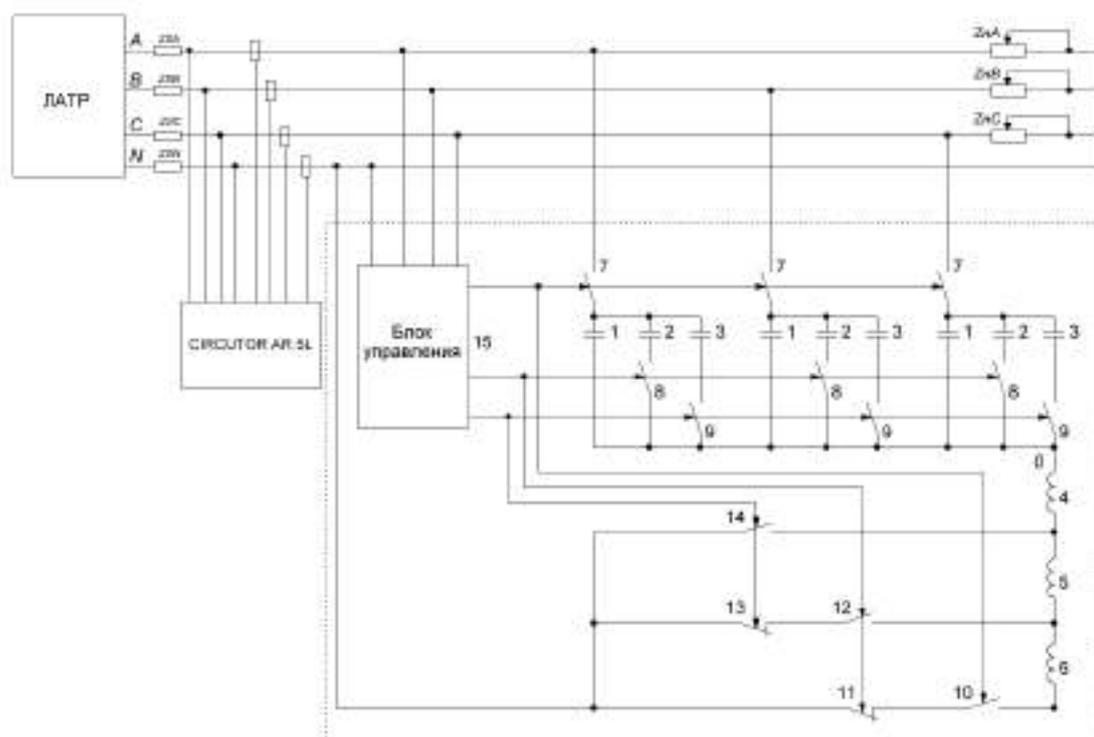


Рисунок 4.1 – Электрическая схема экспериментальной установки [111]

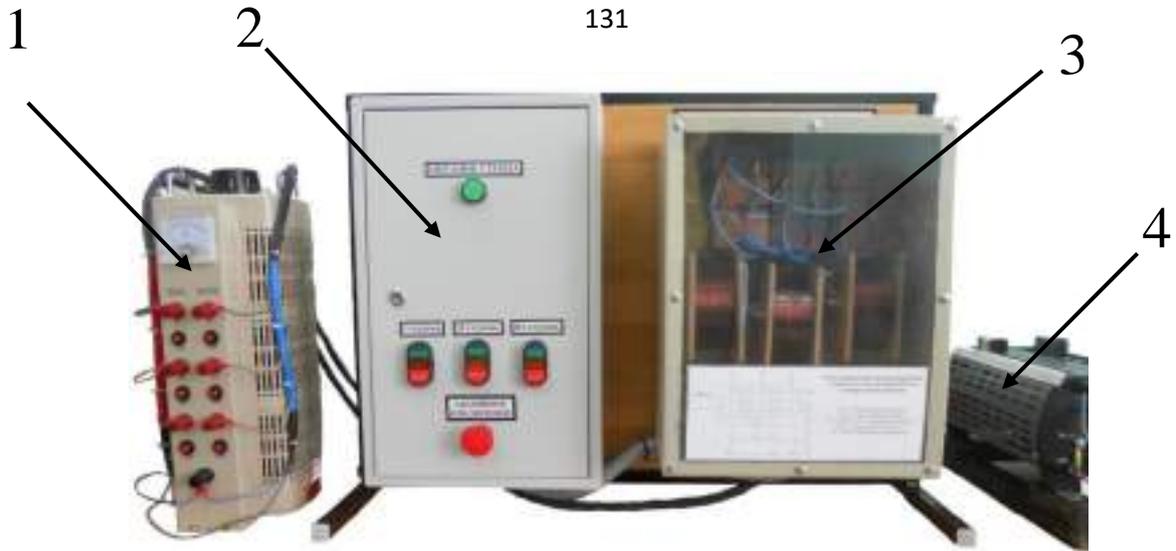


Рисунок 4.2 – Общий вид экспериментальной установки: 1 – трехфазный автотрансформатор; 2 – щит управления; 3 – симметрирующее устройство; 4 – несимметричная нагрузка

Экспериментальная установка состоит из трехфазного автотрансформатора ПрофКиПАТСН-60-380, модели линии электропередачи, несимметричной нагрузки, симметрирующего устройства и блока управления.

Блок управления представляет собой силовой щит, на лицевой панели которого расположена кнопочная станция для управления ступенями СУ. Щит управления оснащен коммутационными аппаратами и аппаратами защиты от аварийных режимов (рисунок 4.3).

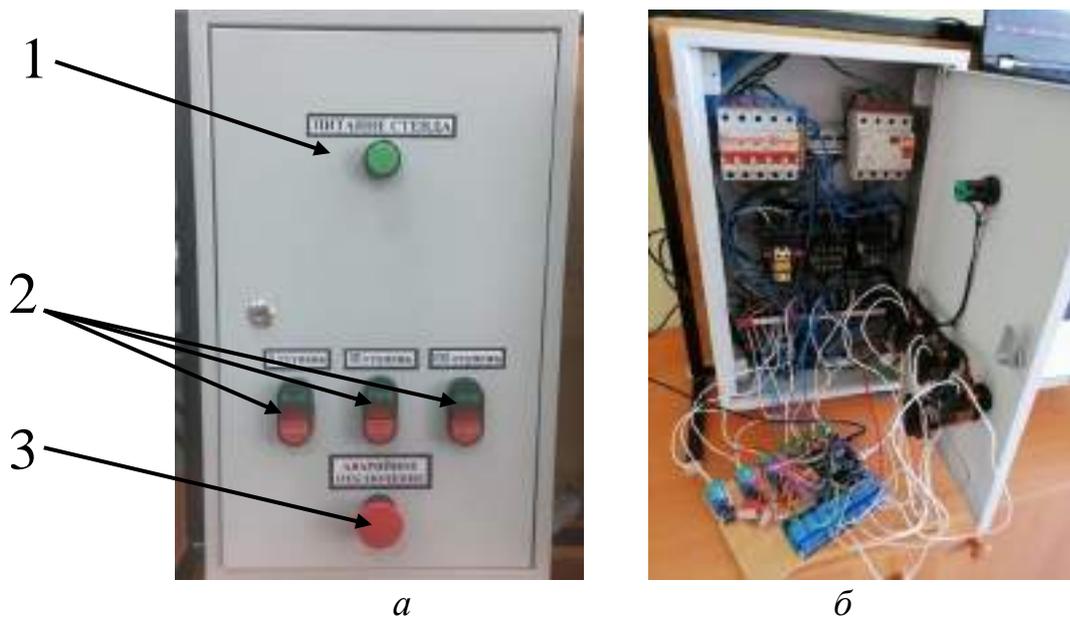


Рисунок 4.3 – Щит управления СУ: а – лицевая панель; б – монтаж щита управления; 1 – индикатор активности стенда; 2 – кнопочная станция управления ступенями СУ; 3 – кнопка аварийного отключения стенда



Рисунок 4.4 – Экспериментальная установка с подключенным ноутбуком



Рисунок 4.5 – Процесс изготовления катушки индуктивности

Модель линии электропередачи имитирует ЛЭП длиной 400 м выполненную проводом А-35 (рис. 4.6). Каждый провод ЛЭП представляет собой катушку на квадратном сердечнике 20*20*50 мм, которая выполнена проводом ПЭТВ – 2 0,93 мм с количеством витков 189 и обладает следующими параметрами: индуктивность $L = 0,042$ Гн, сопротивление постоянному току $R = 0,438$ Ом.

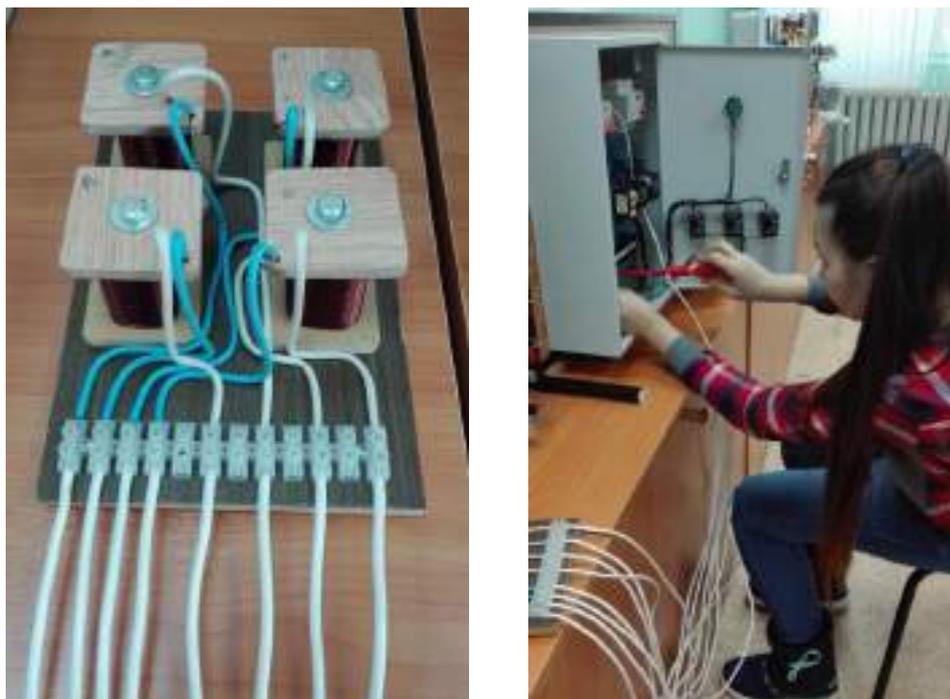


Рисунок 4.6 – Модель линии электропередачи и ее монтаж

Таблица 4.1 - Технические характеристики регулируемого трехфазного автотрансформатора ПрофКиПАТСН-60-380 [112]

Мощность, кВ*А	Номинальное входное напряжение, В	Число фаз	Частота входной сети, Гц	Диапазон регулирования, В	Мах ток, А
45	380	трехфазные	50-60	0-430	60



Рисунок 4.7 – Внешний вид регулируемого трехфазного автотрансформатора [112]

4.2 Программа и методика экспериментальных исследований регулируемого симметрирующего устройства

Основная цель экспериментальных исследований — подтверждение заявленных возможностей регулируемого симметрирующего устройства для трехфазной сети 0,4 кВ с нулевым проводом и снижения потерь электрической энергии при его включении на различные мощности, обусловленных несимметрией токов и напряжений, путем изменения нагрузки в каждой из фаз.

Суть методики исследования – изменение нагрузки в фазах, для создания несимметричных режимов работы сети 0,4 кВ и регистрация экспериментальных данных, для определения уровня несимметрии токов и напряжений, и уровня потерь, обусловленных несимметрией токов и напряжений.

Поэтому в программу исследований вошли следующие вопросы:

1. Общее экспериментальное исследование адекватности конструктивных и электрических параметров элементов регулируемого СУ;
2. Исследования изменения коэффициента потерь K_p при изменении уровня несимметрии;
3. Исследования изменения коэффициента потерь K_p при изменении уровня несимметрии при включении ступеней мощности СУ;
4. Исследование изменения показателей качества электрической энергии относящихся к несимметрии;
5. Исследование зависимостей потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии и ступеней мощности СУ.

Экспериментальные исследования регулируемого симметрирующего устройства проведены в лабораторных условиях на базе кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ.

Для питания стенда использовалось трехфазное напряжение 380 В. Правильность показаний датчиков контролировалось с помощью анализатора качества электрической энергии CIRCUTOR AR.5L.

Порядок проведения эксперимента заключается в постановке задач экспериментальных исследований и составлении программы, согласно которой планируется проводить эксперимент.

Задачами проведения исследований являются:

- сбор и обработка экспериментальных данных;
- на основании экспериментальных данных подтвердить эффективность внедрения регулируемого симметрирующего устройства.

Лабораторные исследования проводились для режимов сети 0,4 кВ:

- при отсутствии СУ;
- при установке СУ в узле нагрузок.

Для опыта I изменялась нагрузка в фазе А; для опыта II – в фазе А и В; для III опыта – в трех фазах [18].

Несимметричные режимы работы модели сети 0,4 кВ создавались изменением сопротивления нагрузочных реостатов РПШ – 5 15 Ом 5А и РПШС – 10 7,5 Ом 10А, подключением ламп ДРЛ 125 Вт и 250 Вт в фазы А, В и С.

Измерения проводились, начиная с симметричного режима работы сети, при котором была включена только симметричная нагрузка. Затем, одновременно увеличивая мощность фаз, в соответствии с таблицами 4.1 — 4.3, регистрировались значения токов и напряжений [11]. Произведен расчёт для различных значений коэффициента несимметрии и дополнительных потерь мощности.

Таблица 4.1– Значения мощностей нагрузок при трехфазной симметричной и однофазной нагрузках

№ опыта	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	Коэффициент несимметрии
1	5700	5700	5700	1 (симметричная нагрузка)
2	6950	5700	5700	1,474
3	7500	5700	5700	1,71
4	8100	5700	5700	2,007
5	9700	5700	5700	2,89
6	10800	5700	5700	3,571

Таблица 4.2 – Значения мощностей нагрузок при трехфазной симметричной и двухфазной нагрузках

№ опыта	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	Коэффициент несимметрии
1	5700	5700	5700	1 (симметричная нагрузка)
2	6950	8100	5700	1,653
3	7500	8800	5700	1,827
4	8100	9700	5700	2,04
5	9700	12100	5700	2,656
6	10800	13900	5700	3,122

Таблица 4.3 – Значения мощностей нагрузок при трехфазной симметричной и трехфазной нагрузках

№ опыта	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	Коэффициент несимметрии
1	5700	5700	5700	1 (симметричная нагрузка)
2	6950	6150	6650	1,177
3	7500	6300	7050	1,257
4	8100	6500	7500	1,354
5	9700	6850	8500	1,619
6	10800	7050	9200	1,808

На рисунке 4.8 представлена экспериментальная установка с несимметричной нагрузкой.

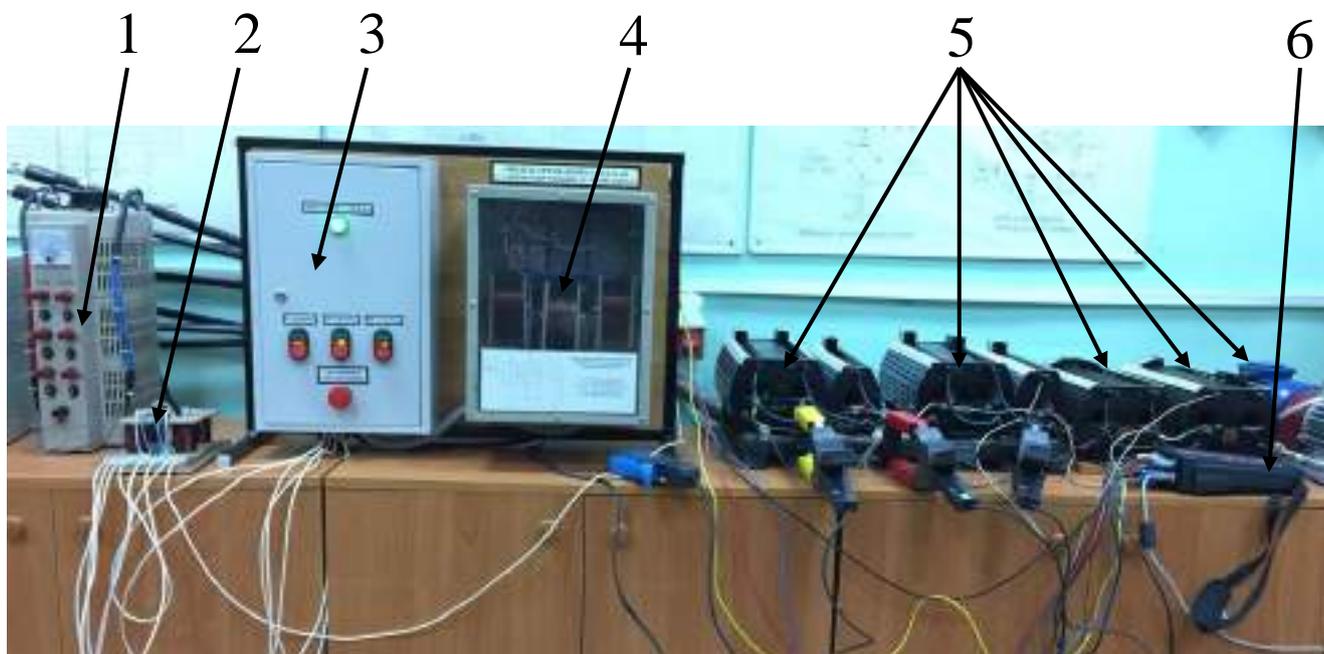


Рисунок 4.8 – Проведение эксперимента [111]:1 – трехфазный автотрансформатор; 2 – модель линии электропередачи; 3 – щит управления; 4 – симметрирующее устройство; 5 – несимметричная нагрузка; 6 – анализатор качества электрической энергии CIRCUTOR AR.5L.

4.3 Экспериментальные исследования симметрирующего устройства и их результаты

На рисунках 4.29 – 4.31 представлены графики изменения коэффициента потерь K_p от уровня несимметрии $K_{нес}$ в соответствии с условиями опытов при экспериментальном исследовании. Для математических вычислений и расчета коэффициента потерь использовалась программа RASPOT-1 и данные, зарегистрированные блоком управления.

Таблица 4.4 – Результаты лабораторного эксперимента. Трехфазная симметричная и однофазная нагрузка (без СУ)

№ опыта Параметр	1	2	3	4	5	6
U_a	210,3	206,9	205,4	203,7	199,5	196,7
U_b	210,3	211,5	212,1	212,6	214,1	215
U_c	210,4	210,8	210,9	211,2	211,8	212,2
φ_a	-0,9284	-1,229	-1,353	-1,505	-1,877	-2,112
φ_b	-120,9	-121,2	-121,4	-121,5	-121,9	-122,2
φ_c	119,1	119,5	119,7	119,9	120,5	120,8
I_a	26,27	31,07	33,11	35,46	41,39	45,2
I_b	26,27	26,4	26,46	26,53	26,7	26,81
I_c	26,27	26,32	26,34	26,36	26,43	26,48
I_1	26,27	27,93	28,64	29,45	31,5	32,82
I_2	0	1,662	2,37	3,182	5,234	6,555
I_0	0	1,48	2,11	2,833	4,66	5,836
φ_1	-0,923	-0,9961	-1,035	-1,085	-1,235	-1,346
φ_2	-87,97	-2,2	-2,341	-2,435	-2,826	-3,062
φ_0	76,24	-4,318	-4,448	-4,592	-4,968	-5,207
U_1	210,3	209,7	209,5	209,2	208,4	207,9
U_2	0,01621	0,6551	0,9347	1,249	2,057	2,575
U_0	0	2,319	3,307	4,441	7,304	9,147
φ_1	-0,923	-0,9807	-1,005	-1,032	-1,1	-1,142
φ_2	-87,97	-161,1	-161	-162,1	-162,2	-162,5
φ_0	-32,44	-164,2	-164,4	-164,5	-164,9	-165,1
K_{2U}	0	0,003	0,004	0,006	0,01	0,012
K_{0U}	0	0,011	0,016	0,021	0,035	0,044
K_{2I}	0	0,06	0,083	0,108	0,166	0,2
K_{0I}	0	0,053	0,074	0,096	0,148	0,178
K_p	1	1,015	1,029	1,049	1,115	1,166

Таблица 4.5 – Результаты лабораторного эксперимента. Трехфазная симметричная и однофазная нагрузка (При включении СУ).

№ опыта Параметр	1	2	3	4	5	6
U _a	210,3	208,7	208	207,1	204,9	203,5
U _b	210,3	211	211,2	211,5	212,2	212,7
U _c	210,4	209,7	209,4	209,1	208,1	207,5
φ_a	-0,9284	-1,356	-1,513	-1,709	-2,189	-2,502
φ_b	-120,9	-120,8	-120,8	-120,7	-120,5	-120,4
φ_c	119,1	119,1	119,1	119,2	119,2	119,3
I _a	26,27	30,13	31,79	33,71	38,63	41,86
I _b	26,27	26,44	26,53	26,63	26,96	27,21
I _c	26,27	27,34	27,81	28,36	29,78	30,74
I ₁	26,27	27,96	28,68	29,51	31,65	33,05
I ₂	0	1,677	2,4	3,236	5,379	6,783
I ₀	0	0,673	0,9629	1,299	2,159	2,722
φ_1	-0,923	0,02847	-0,04481	-0,1348	-0,3885	-0,5701
φ_2	-87,97	-2,411	-2,589	-2,751	-3,293	-3,48
φ_0	76,24	43,02	42,86	42,67	42,19	41,87
U ₁	210,3	209,8	209,5	209,2	208,4	207,9
U ₂	0,01621	0,6631	0,9498	1,278	2,115	2,66
U ₀	0	1,055	2,509	2,036	3,384	4,266
φ_1	-0,923	-1,032	-1,056	-1,084	-1,153	-1,196
φ_2	-87,97	-160,6	-160,6	-161,2	-162,5	-163,2
φ_0	-32,44	-116,9	-117,1	-117,2	-117,7	-118
K _{2U}	0	0,003	0,005	0,006	0,01	0,013
K _{0U}	0	0,005	0,012	0,01	0,016	0,021
K _{2I}	0	0,06	0,084	0,11	0,17	0,205
K _{0I}	0	0,024	0,034	0,044	0,068	0,082
K _p	1	1,006	1,012	1,02	1,047	1,069

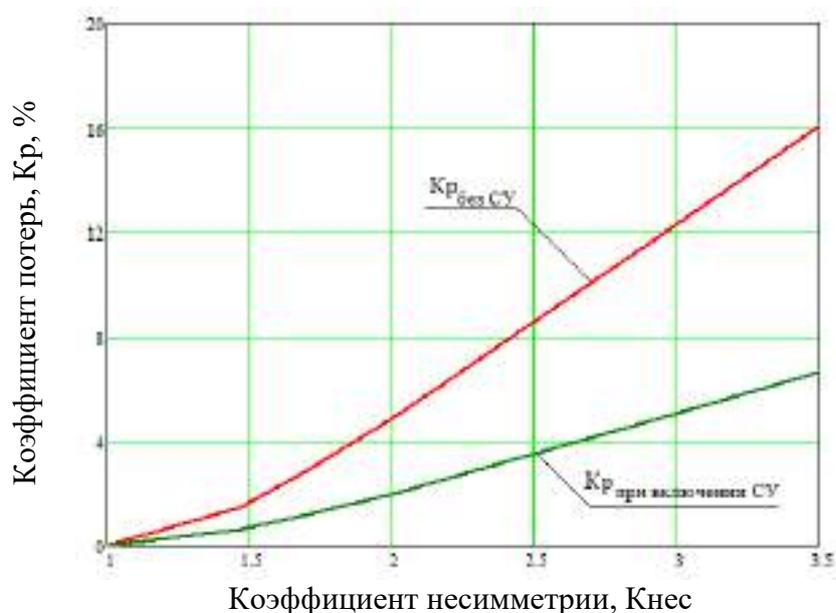


Рисунок 4.9 – График изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

По рисунку 4.9 видно, что при режиме работы сети 0,4 кВ с установленным СУ в узле нагрузок на различных мощностях коэффициент потерь K_p , обусловленный несимметричной нагрузкой, снизился с 1,166 до величины 1,069, что составляет 9,7 %.

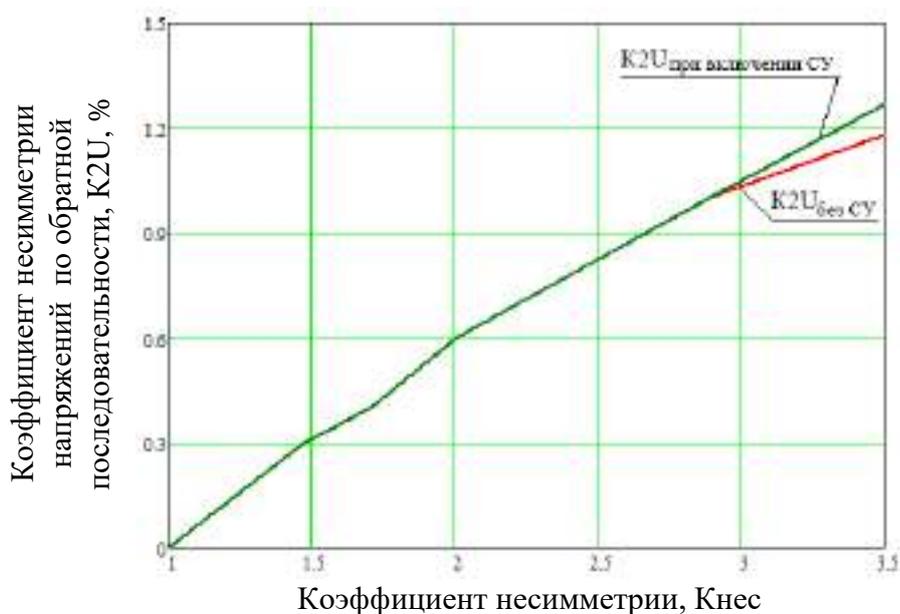


Рисунок 4.10 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

По рисунку 4.10 видно, что коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности в условиях данного эксперимента имеет незначительное увеличение.

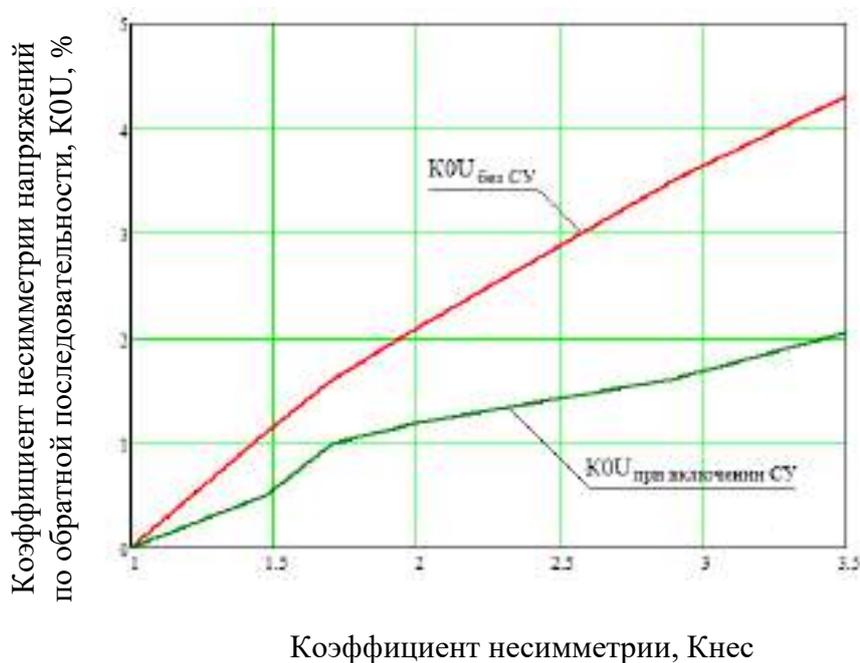


Рисунок 4.11 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

На рисунке 4.11 представлен график изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки. Коэффициент K_{OU} , для максимального коэффициента несимметрии данного опыта, при включении СУ снизился с 0,044 до величины 0,021, т.е. на 2,3 %.

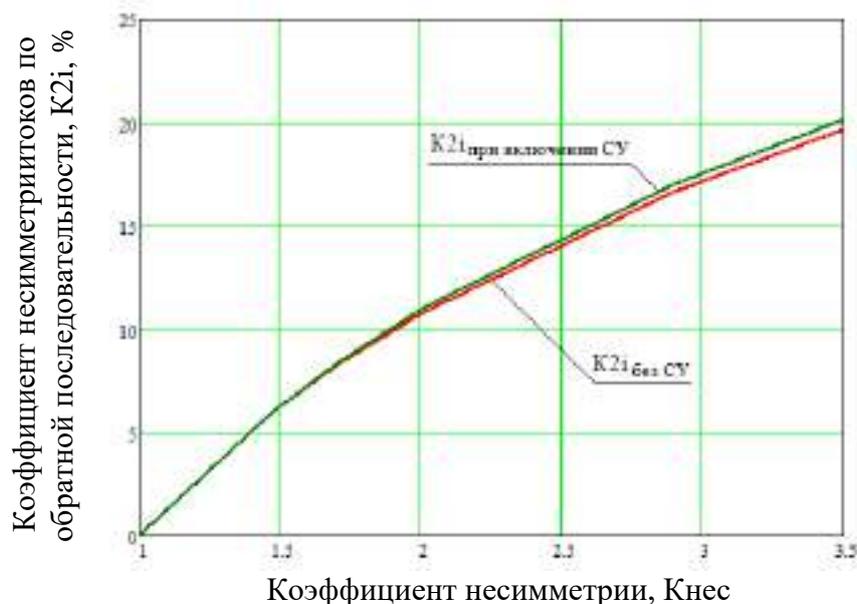


Рисунок 4.12 – График изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

Коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности имеет незначительное увеличение.

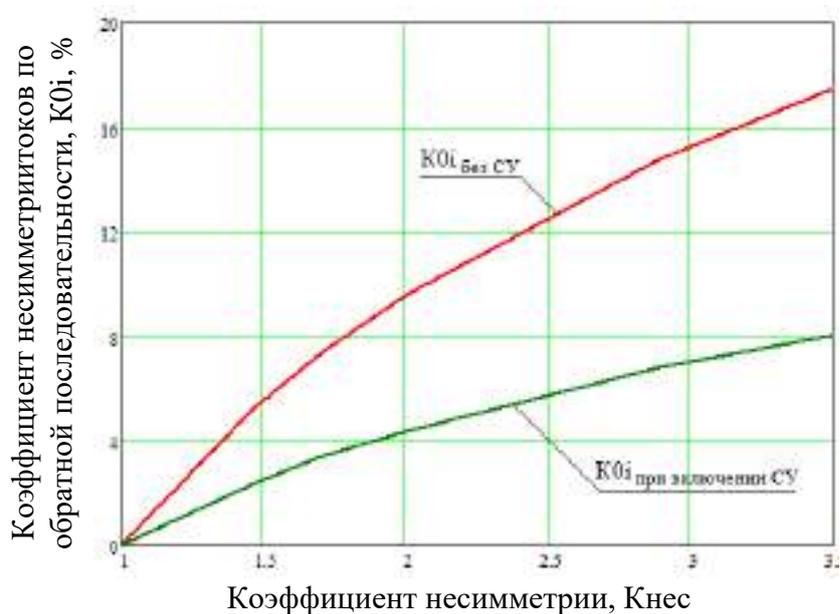
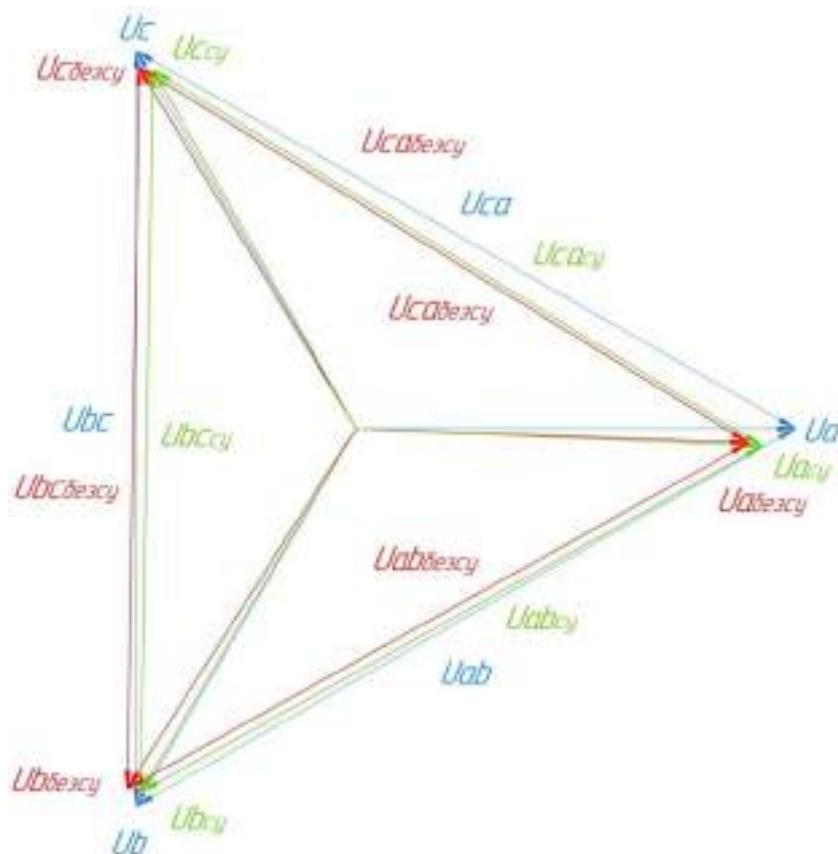


Рисунок 4.13 – График изменения коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

Коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности при включении СУ снизился с 0,178 до величины 0,082, т.е. на 9,6 %.



- Векторная диаграмма напряжений без включения СУ
- Векторная диаграмма напряжений при включении СУ
- Векторная диаграмма напряжений симметричной трехфазной сети

Рисунок 4.14– Векторная диаграмма напряжений для максимального уровня несимметрии для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки

Таблица 4.6 – Результаты лабораторного эксперимента. Трехфазная симметричная и двухфазная нагрузка (без СУ).

№ опыта	1	2	3	4	5	6
Ua	210,3	207,7	206,5	205,2	201,8	199,8
Ub	210,3	204,9	203,4	201,7	197	193,7
Uc	210,4	213	213,9	214,8	217,3	218,9
φ_a	-0,9284	-0,3847	-0,264	-0,1193	0,2766	0,56
φ_b	-120,9	-121,8	-122,1	-122,5	-123,4	-124
φ_c	119,1	118,9	118,9	118,9	118,9	118,8
Ia	26,27	31,19	33,28	35,69	41,85	45,87
Ib	26,27	35,65	38,48	41,82	50,7	56,79
Ic	26,27	26,58	26,67	26,78	27,07	27,25
II	26,27	31,14	32,81	34,76	39,86	43,28

I2	0	2,811	3,691	4,745	7,612	9,613
I0	0	2,432	3,151	3,995	6,188	7,641
$\varphi 1$	-0,923	-1,13	-1,21	-1,309	-1,587	-1,786
$\varphi 2$	-87,97	85,88	82,29	79,89	77,16	76,44
$\varphi 0$	76,24	-93,47	-90,32	-88,44	-87,08	-87,32
U1	210,3	208,5	207,9	207,2	205,3	204
U2	0,01621	1,124	1,457	1,879	3,008	3,794
U0	0	3,812	4,938	6,262	9,7	11,98
$\varphi 1$	-0,923	-1,092	-1,15	-1,216	-1,387	-1,5
$\varphi 2$	-87,97	-74,26	-77,66	-80,04	-82,75	-83,44
$\varphi 0$	-32,44	106,6	109,8	111,6	113	112,8
K _{2U}	0	0,005	0,007	0,009	0,015	0,019
K _{0U}	0	0,018	0,024	0,03	0,047	0,059
K2I	0	0,09	0,112	0,137	0,191	0,222
K0I	0	0,078	0,096	0,115	0,155	0,177
Kp	1	1,033	1,05	1,071	1,113	1,174

Таблица 4.7 – Результаты лабораторного эксперимента. Трехфазная симметричная и двухфазная нагрузка (При включении СУ).

Параметр \ № опыта	№ опыта					
	1	2	3	4	5	6
Ua	210,3	207,3	206,2	204,9	201,9	199,7
Ub	210,3	207,6	206,9	205,9	203,5	201,7
Uc	210,4	210,8	210,8	210,9	210,3	210,3
φa	210,3	-1,236	-1,354	-1,498	-1,962	-2,219
φb	210,3	-121,6	-121,7	-121,9	-122,2	-122,6
φc	210,4	119,4	119,5	119,6	-1,962	-2,219
Ia	26,27	32,19	34,48	37,15	43,89	48,5
Ib	26,27	33,86	36,19	38,96	46,21	51,37
Ic	26,27	27,63	28,17	28,8	31,03	32,3
I1	26,27	31,19	32,89	34,88	40,15	43,72
I2	0	2,816	3,685	4,728	7,525	9,479
I0	0	1,124	1,469	1,88	2,534	3,185
$\varphi 1$	-0,923	-0,2307	-0,3725	-0,5399	-1,305	-1,57
$\varphi 2$	-87,97	86,57	83,21	81,06	79,14	78,9
$\varphi 0$	76,24	-46,3	-43,23	-41,46	-35,91	-36,31
U1	210,3	208,6	208	207,2	205,2	203,9
U2	0,01621	1,133	1,473	1,88	2,953	3,717
U0	0	1,762	2,302	2,947	3,971	4,993
$\varphi 1$	-0,923	-1,143	-1,201	-1,268	-1,418	-1,534
$\varphi 2$	-87,97	-73,69	-76,88	-78,92	-80,74	-80,97
$\varphi 0$	-32,44	153,8	156,8	158,6	164,2	163,8
K _{2U}	0	0,005	0,007	0,005	0,014	0,018
K _{0U}	0	0,008	0,011	0,014	0,019	0,024
K2I	0	0,09	0,112	0,136	0,187	0,217
K0I	0	0,036	0,045	0,054	0,063	0,073
Kp	1	1,013	1,021	1,03	1,051	1,068

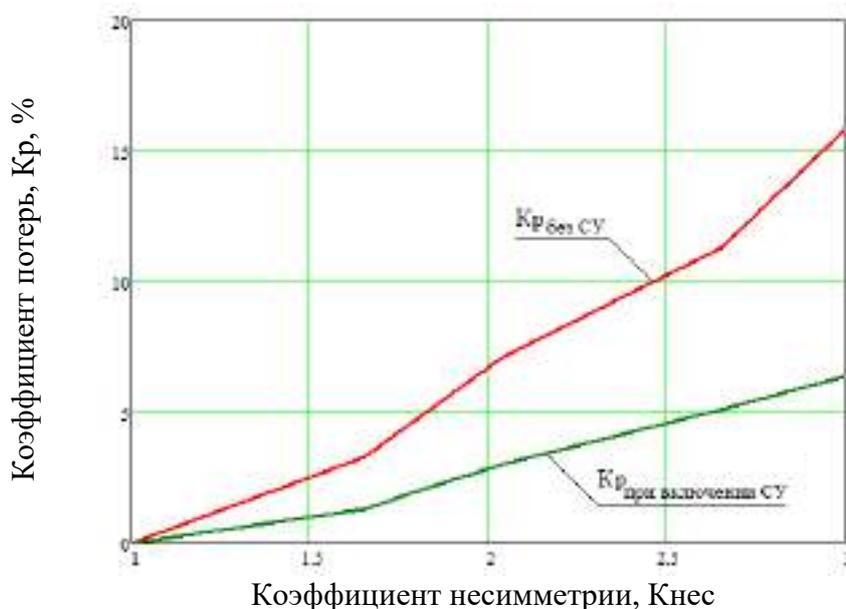


Рисунок 4.15 – График изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

На рисунке 4.15 представлен график изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки. По графику видно, что K_p снижается с величины 1,174 до 1,068, что составляет 10,6 %.

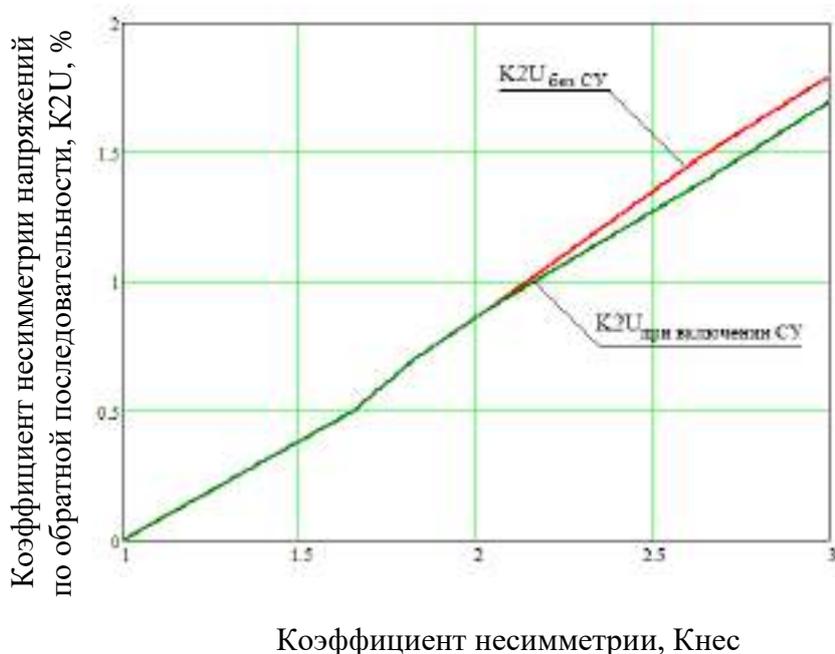
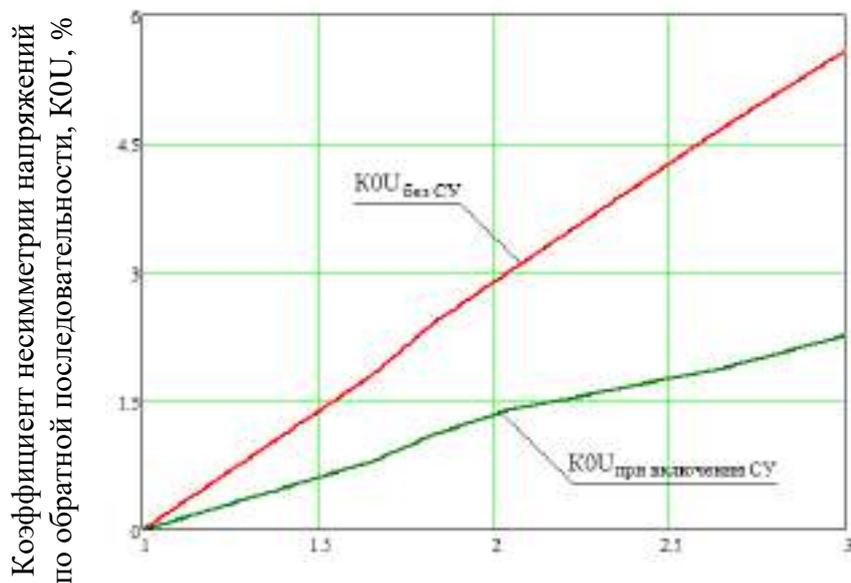


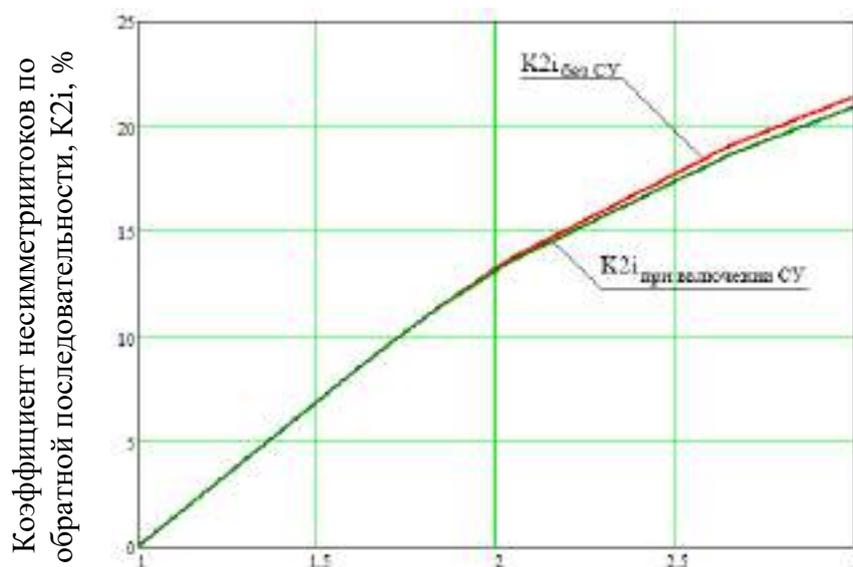
Рисунок 4.16 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

По рисунку 4.16 видно, что коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности в условиях данного эксперимента незначительно уменьшается.



Коэффициент несимметрии, $K_{нес}$

Рисунок 4.17 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки



Коэффициент несимметрии, $K_{нес}$

Рисунок 4.18 – График изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

На рисунке 4.17 представлен график изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки. Коэффициент K_{0u} , для максимального коэффициента несимметрии данного опыта, при включении СУ снизился с 0,059 до величины 0,024, т.е. на 3,5 %.

По графику на рисунке 4.18 видно, что коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности имеет незначительное увеличение.

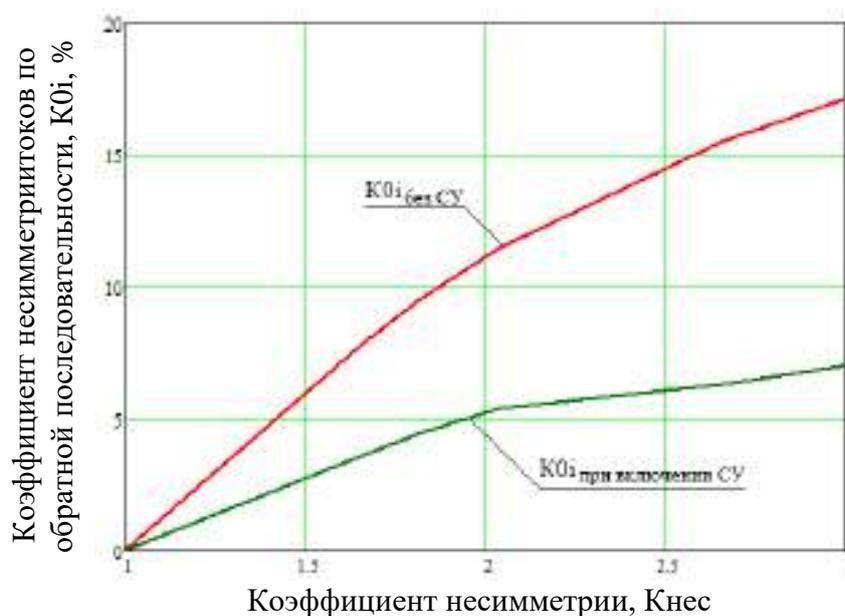
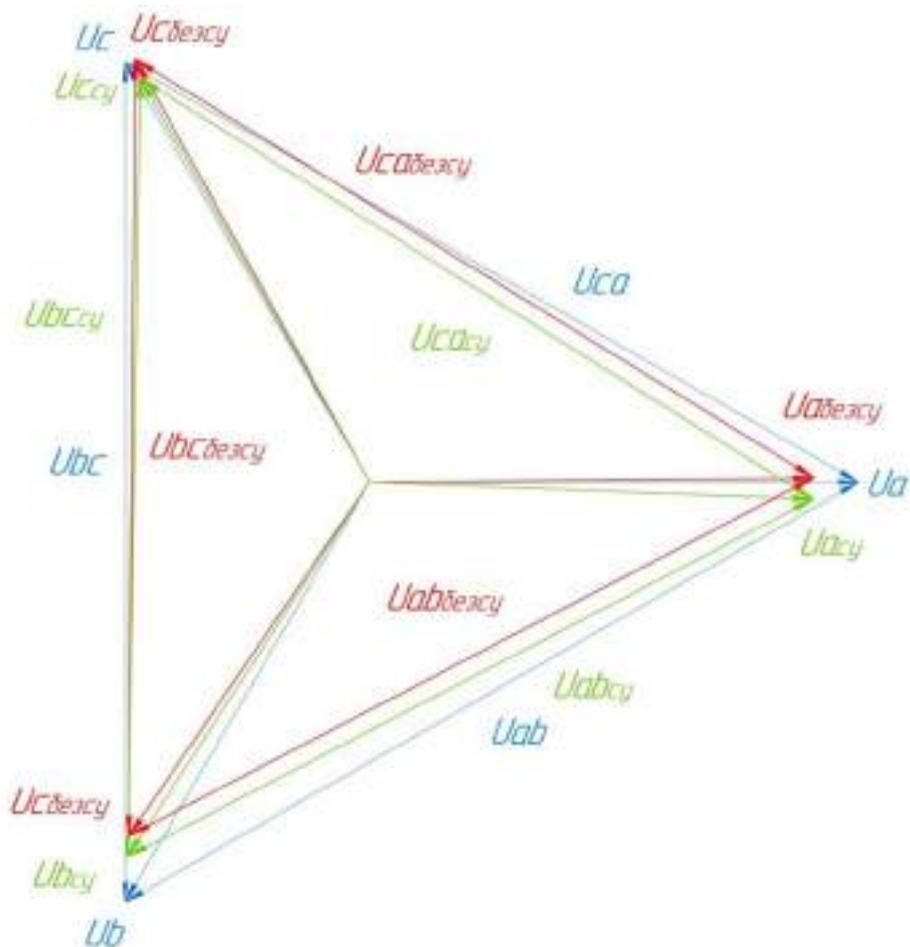


Рисунок 4.19 – График изменения коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

В условиях проведенного эксперимента, коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности при включении СУ на различные мощности снизился с 0,177 до величины 0,073, что составляет 10,4 %.



- Векторная диаграмма напряжений без включения СУ
- Векторная диаграмма напряжений при включении СУ
- Векторная диаграмма напряжений симметричной трехфазной сети

Рисунок 4.20 – Векторная диаграмма напряжений для максимального уровня несимметрии для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки

Таблица 4.8 – Результаты лабораторного эксперимента. Трехфазная симметричная и трехфазная нагрузка (без СУ)

№ опыта	1	2	3	4	5	6
Ua	210,3	208	206,9	205,7	202,4	200,3
Ub	210,3	210,6	210,8	211	211,7	212,3
Uc	210,4	208,5	207,8	207	205,1	203,9
φ_a	26,27	-1,313	-1,481	-1,674	-2,164	-2,488
φ_b	0	-121	121	-121,1	-121,2	-121,3
φ_c	0	119,2	119,2	119,3	119,5	119,6
Ia	26,27	31,22	33,34	35,78	41,97	45,98
Ib	26,27	28,17	28,88	29,64	31,32	32,26
Ic	26,27	30,08	31,63	33,35	37,47	39,97
Il	26,27	29,82	31,28	32,92	36,92	39,4

I2	0	0,9508	1,392	1,923	3,361	4,351
I0	0	0,8279	1,203	1,647	2,818	3,6
φ_1	-0,923	-1,052	-1,108	-1,173	-1,338	-1,447
φ_2	-87,97	-41,6	-41,08	-40,51	-39,21	-38,49
φ_0	76,24	34,71	33,82	32,83	30,44	28,97
U1	210,3	209	208,5	207,9	206,4	205,5
U2	0,01621	0,3652	0,5378	0,7463	1,316	1,705
U0	0	1,298	1,886	2,582	4,416	5,642
φ_1	-0,923	-1,048	-1,099	-1,156	-1,295	-1,38
φ_2	-87,97	161,3	161	161	161	161,7
φ_0	-32,44	-125,2	-126,1	-127,1	-129,5	-130,9
K _{2U}	0	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008
K _{0U}	0	0,006	0,009	0,012	0,021	0,027
K2I	0	0,032	0,045	0,058	0,091	0,11
K0I	0	0,028	0,038	0,05	0,076	0,91
Kp	1	1,004	1,008	1,013	1,032	1,046

Таблица 4.9 – Результаты лабораторного эксперимента. Трехфазная симметричная и трехфазная нагрузка (При включении СУ)

Параметр	№ опыта					
	1	2	3	4	5	6
Ua	210,3	208,9	208,2	207,5	205,5	204,2
Ub	210,3	209,8	209,6	209,4	209	208,9
Uc	210,4	208,6	207,8	207	204,8	203,4
φ_a	26,27	-1,227	-1,339	-1,468	-1,823	-2,064
φ_b	0	-120,9	-120,9	-120,9	-120,7	-120,7
φ_c	0	118,9	118,8	118,7	118,5	118,4
Ia	26,27	30,61	32,45	34,56	39,93	43,41
Ib	26,27	28,59	29,48	30,45	32,64	33,91
Ic	26,27	30,34	32,01	33,9	38,51	41,38
II	26,27	29,84	31,3	32,95	36,99	39,5
I2	0	0,9494	1,39	1,919	3,359	4,349
I0	0	0,3802	0,5564	0,768	1,34	1,732
φ_1	-0,923	-0,09549	-0,2025	-0,3204	-0,6033	-0,7779
φ_2	-87,97	-41,41	-40,8	-40,05	-38,46	-37,41
φ_0	76,24	81,96	81	79,92	77,32	75,71
U1	210,3	209,1	208,6	207,9	206,4	205,5
U2	0,01621	0,3667	0,5385	0,7498	1,306	1,705
U0	0	0,5959	0,8722	1,204	2,1	2,715
φ_1	-0,923	-1,098	-1,149	-1,207	-1,345	-1,431
φ_2	-87,97	160,6	161,2	160,5	163	162,7
φ_0	-32,44	-77,95	-78,91	-79,99	-82,59	-84,21
K _{2U}	0	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008
K _{0U}	0	0,003	0,004	0,006	0,01	0,013
K2I	0	0,032	0,045	0,058	0,091	0,11
K0I	0	0,013	0,018	0,023	0,036	0,044
Kp	1	1,002	1,003	1,006	1,013	1,02

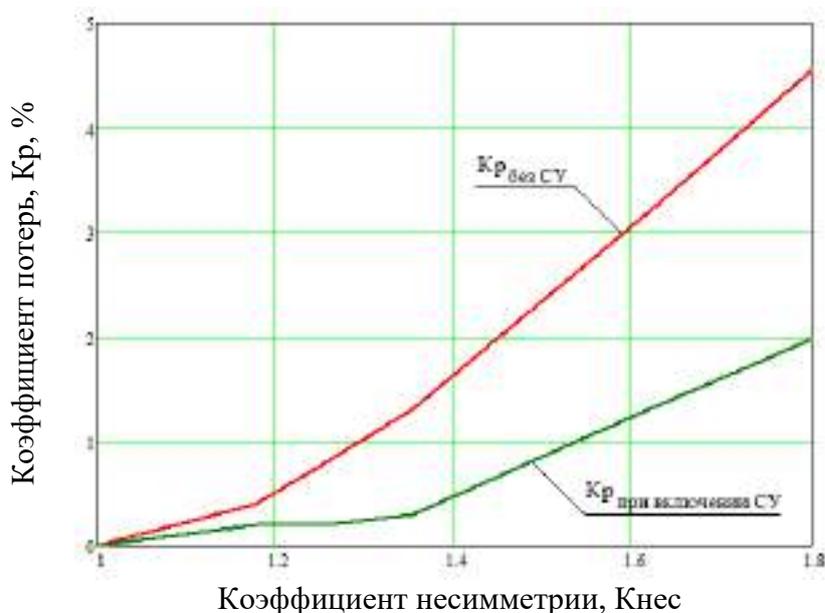


Рисунок 4.21 – График изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

На рисунке 4.21 представлен график изменения коэффициента потерь от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки. По графику видно, что K_p снижается с величины с 1,046 до величины 1,02, что составляет 2,6 %.

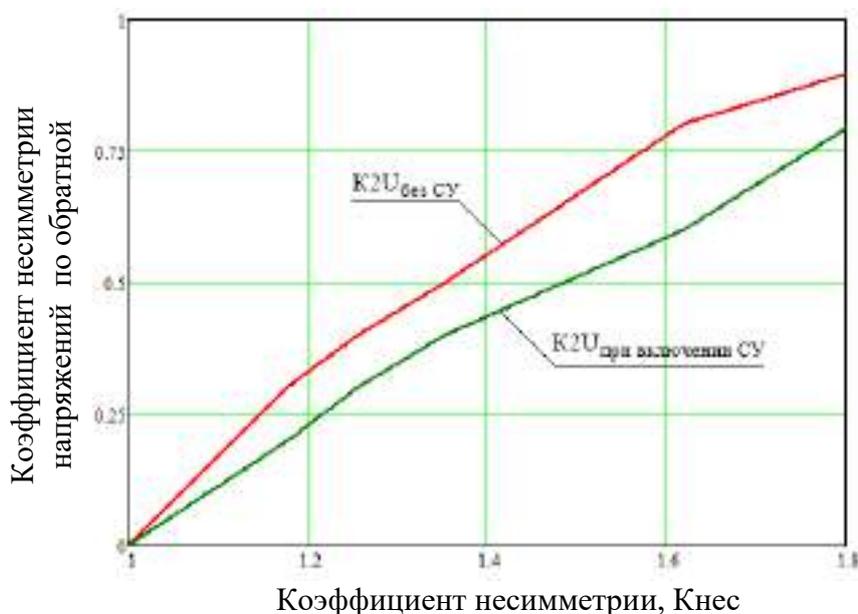


Рисунок 4.22 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

На рисунке 4.22 представлен график изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки и при включении СУ на различные ступени мощности. По графику видно, что K_{2U} снижается с величины 0,09 до 0,08.

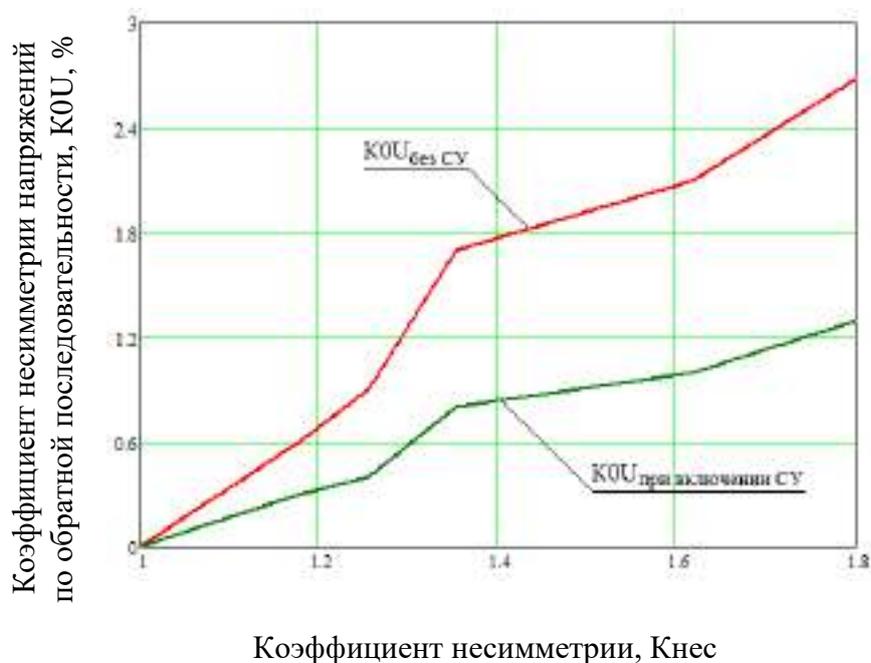


Рисунок 4.23 – График изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

При изменении нагрузки по каждой фазе (рис. 4.21 - 4.28) коэффициент несимметрии $K_{нес}$ изменяется от симметричной нагрузки $K_{нес} = 1$ до величины 1,808.

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности в условиях данного эксперимента снизился с 0,27 на величину 0,13, что составляет 1,4 %

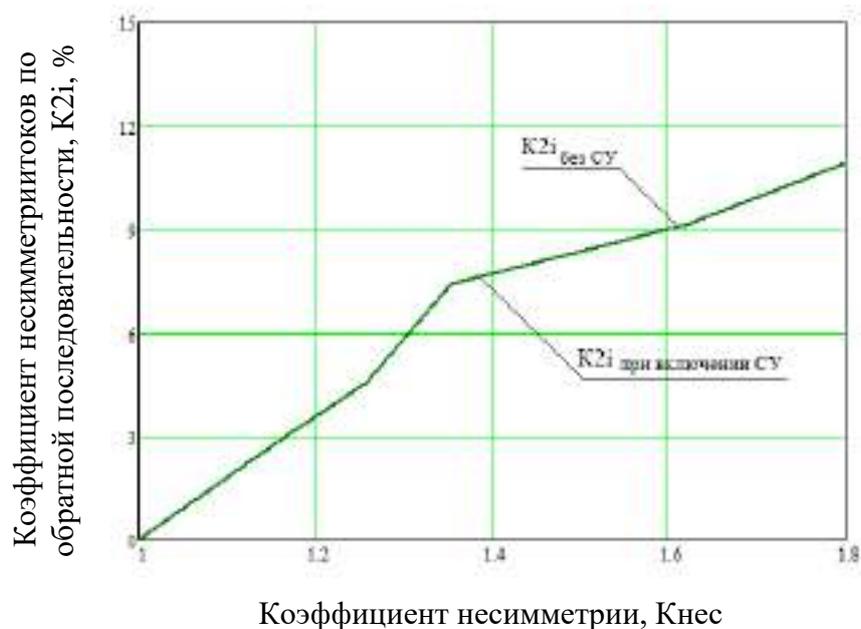


Рисунок 4.23 – График изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

Коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности в условиях данного эксперимента остался неизменным.

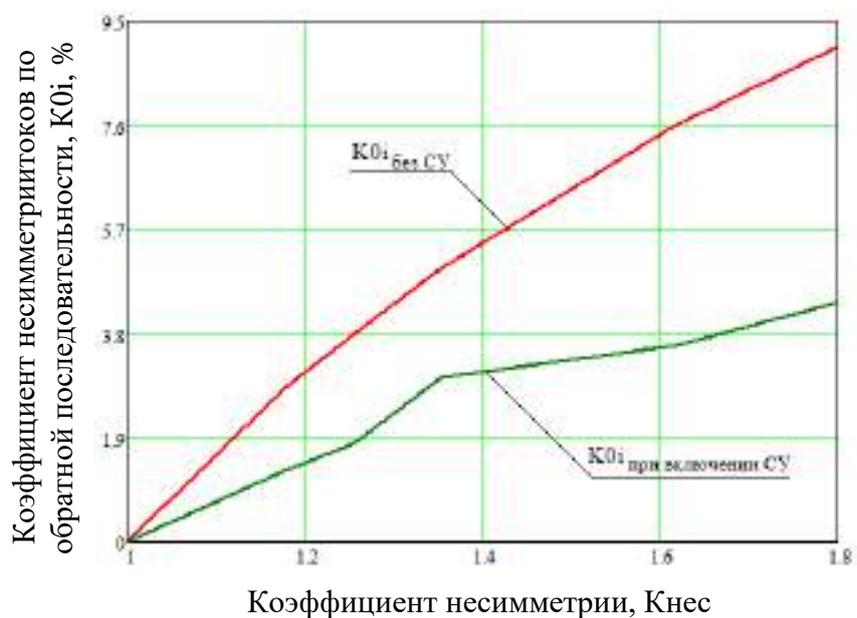


Рисунок 4.24 – График изменения коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности от уровня несимметрии для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки

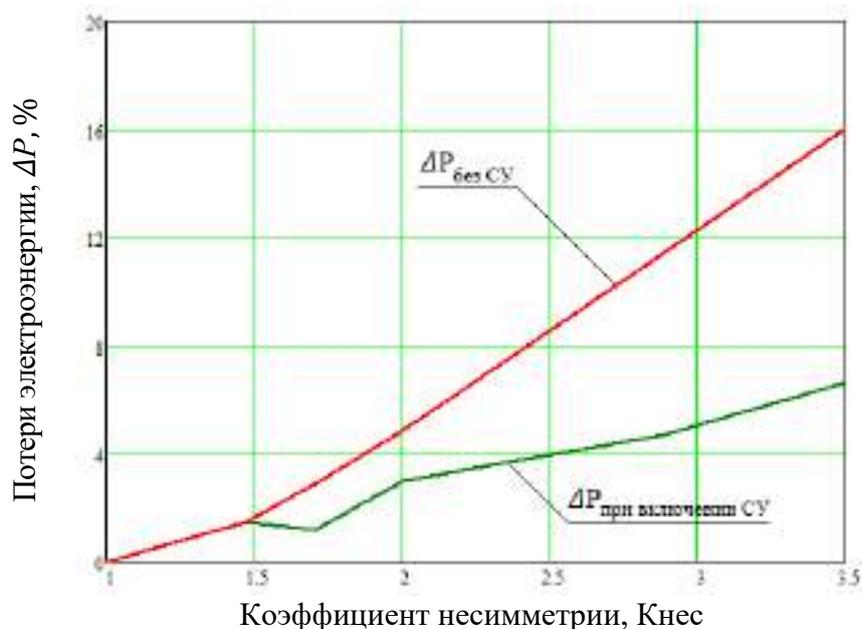


Рисунок 4.26 – Зависимость потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки)

Для опыта, где нагрузка изменялась в одной фазе, построена зависимость потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии. При максимальном уровне несимметрии потери снизились на 9 %.

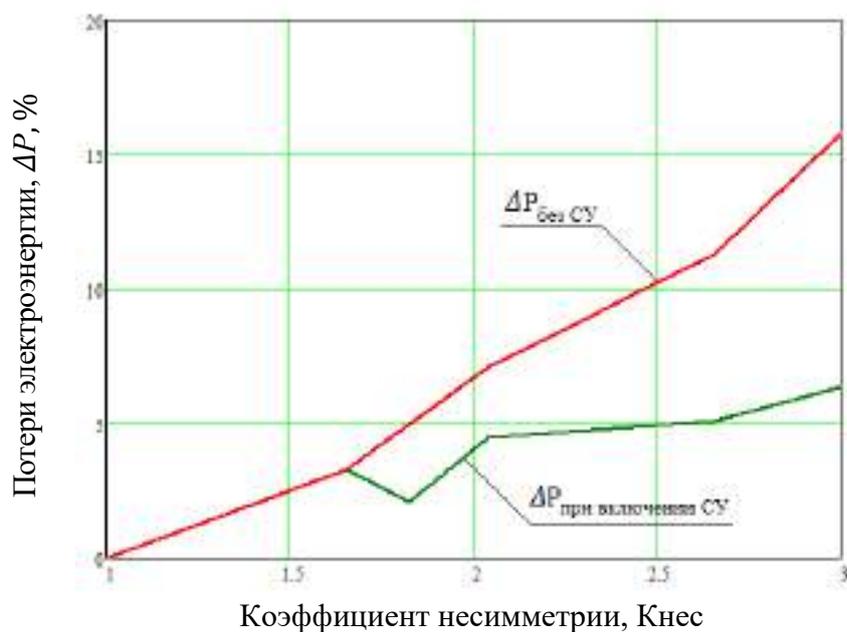


Рисунок 4.27 – Зависимость потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки)

Для опыта, где нагрузка изменялась в двух фазах, построена зависимость потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии. При максимальном уровне несимметрии потери снизились на 10 %.

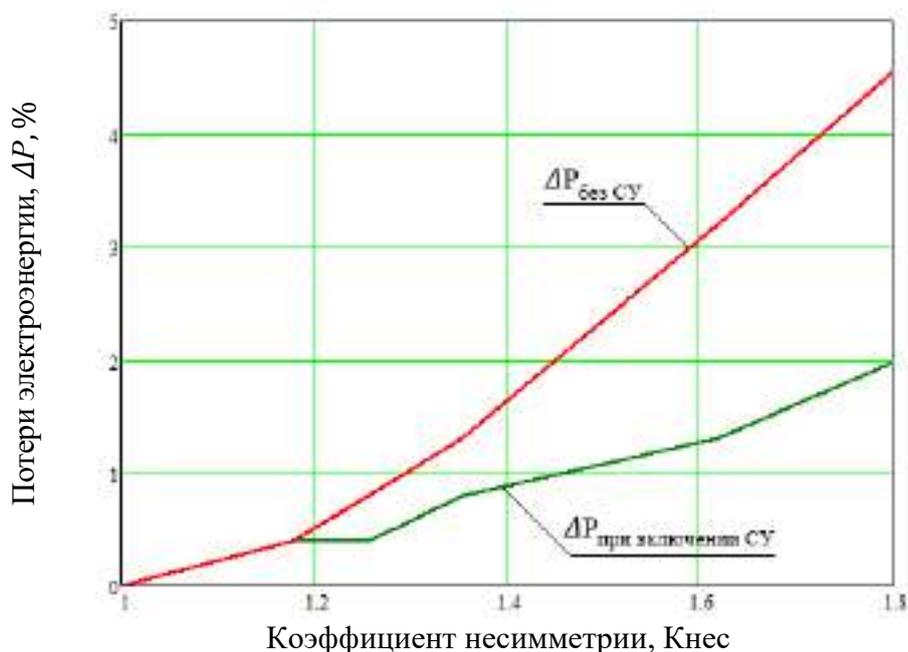


Рисунок 4.28 – Зависимость потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки)

Для опыта (рисунок 4.28), где изменялась нагрузка в трех фазах при максимальном уровне несимметрии, потери снизились на 2 %.

В результате практических экспериментов удалось получить значения коэффициента потерь от несимметрии, коэффициентов несимметрии напряжений и токов по обратной и нулевой последовательностей, а также значения потерь электрической энергии [113].

Для сравнения полученных результатов лабораторного эксперимента с теоретическими данными необходимо учитывать идентичные условия опытов для каждого эксперимента.

На рисунках 4.29 – 4.31 представлены графики результатов теоретического и экспериментального исследования снижения потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии.

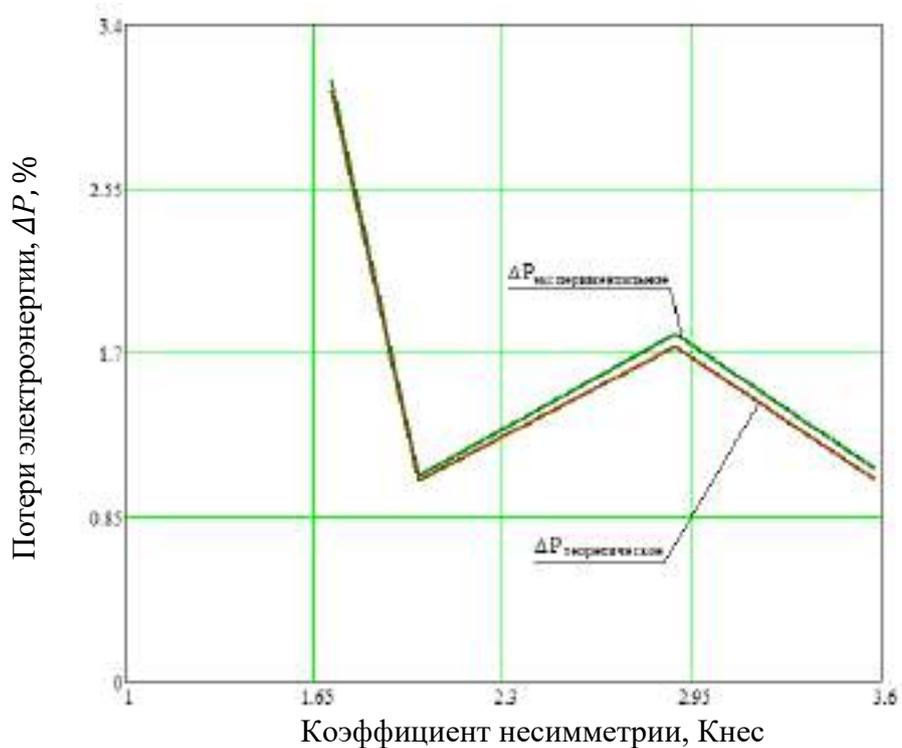


Рисунок 4.29 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных снижения потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и однофазной нагрузки)

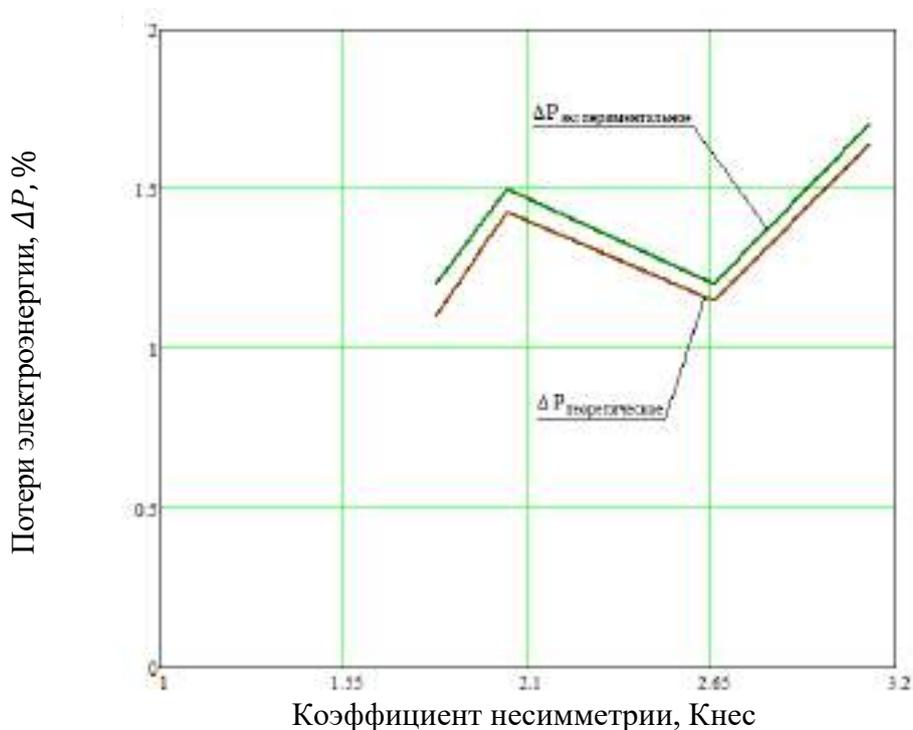


Рисунок 4.30 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных снижения потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и двухфазной нагрузки)

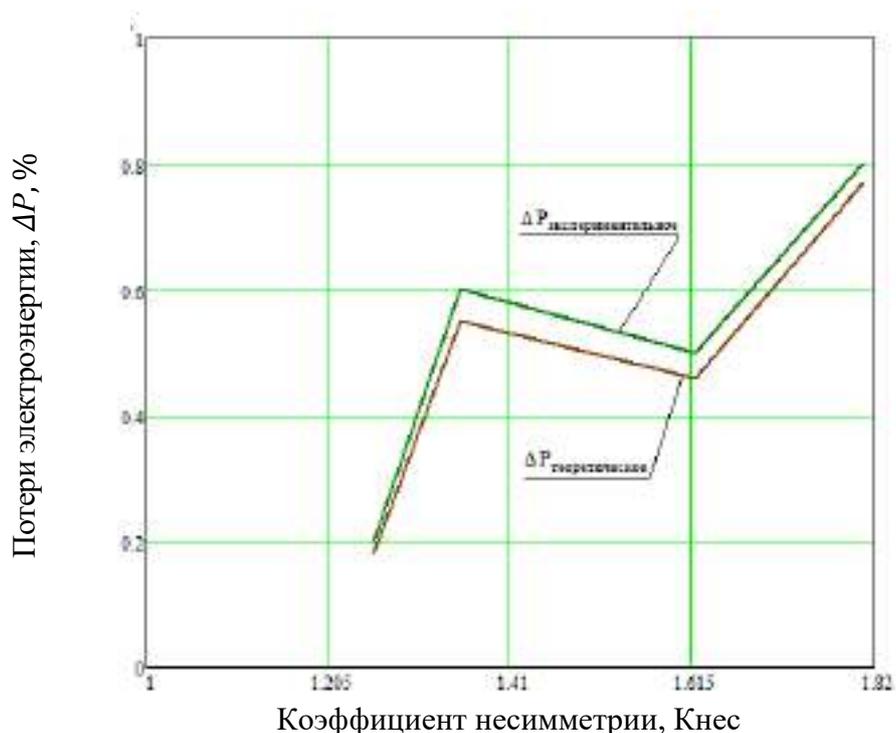


Рисунок 4.31 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных снижения потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии (для трехфазной симметричной и трехфазной нагрузки)

Средний процент расхождения теоретических и экспериментальных данных составляет 2,5%, максимальный не превышает 5 %. Это дополнительно подтверждает работоспособность предлагаемого регулируемого симметрирующего устройства и алгоритма его работы.

Проведен эксперимент, в ходе которого была подтверждена работоспособность изложенного способа в пункте 2.1. Лабораторные испытания подтвердили заявленные характеристики устройства. Регулируемое симметрирующее устройство позволяет в значительной степени снизить потери электрической энергии в сети 0,4 кВ и выполнить симметрирование токов и напряжений.

Лабораторный стенд внедрен в учебный процесс на кафедре «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ. Акт внедрения представлен в приложении Б стр. 191.

Опытный образец устройства передан для опытной эксплуатации в ЗАО «Покровская слобода» для выявления его эксплуатационных характеристик и внедрения его в производство. Акт внедрения представлен в приложении Б стр 192.

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработан стенд «Модель трехфазной сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством». Проведено экспериментальное исследование несимметричных режимов работы сельских электрических сетей 0,4 кВ, а так же уровня потерь.

2. Проведенные испытания экспериментального образца устройства регулируемого симметрирующего устройства в полной мере подтвердили его работоспособность.

3. В результате лабораторных экспериментов были получены зависимости коэффициента, коэффициентов несимметрии токов и напряжений, и потерь электрической энергии от коэффициента несимметрии. Из результатов проведенных исследований следует, что предложенное устройство эффективно снижает потери при различных режимах работы. Максимальное снижение коэффициента потерь K_p в условиях лабораторного эксперимента составляет 10,6 %. Соответствие полученных зависимостей с теоретическими исследованиями подтверждено сравнением расчетов. Средний процент расхождения теоретических и экспериментальных данных составляет 2,5 %, максимальный не превышает 5 %.

4. Лабораторный стенд внедрен в учебный процесс на кафедре «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ.

5. Опытный образец устройства передан для опытной эксплуатации в ЗАО «Покровская слобода» для выявления его эксплуатационных характеристик и внедрения его в производство.

5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 КВ

Целью данного раздела является экономическое обоснование регулируемого симметрирующего устройства.

Регулируемое симметрирующее устройство прошло производственные испытания в ЗАО «Покровская слобода». Основным видом деятельности данной организации является смешанное сельское хозяйство.

5.1 Оценка затрат на внедрение РСУ в электрические сети на примере ЗАО «Покровская слобода».

Для того, чтобы провести оценку экономической эффективности устройства, необходимо сравнить затраты (экономические показатели) на создание и эксплуатацию устройства с экономическим эффектом (показателями его эффективности) [114].

Затраты на создание и эксплуатацию будут складываться из:

- рыночной стоимости конденсаторов;
- рыночной стоимости индуктивного элемента;
- рыночной стоимости состава блока управления;
- рыночной стоимости монтажных работ по сборке устройства;
- рыночной стоимости работ по технической эксплуатации (на техническое обслуживание и текущий ремонт) устройства.

Экономический эффект от использования устройства будет оцениваться стоимостью сбереженной электроэнергии [114].

Определим затраты на создание и эксплуатацию устройства, а также рассчитаем экономический эффект и показатели эффективности в соответствии с исходными данными.

Затраты на регулируемое СУ складываются из затрат на создание устройства и затрат на его эксплуатацию [114].

Регулируемое симметрирующее устройство выполнено на индуктивно-ёмкостных элементах. Оно состоит из девяти конденсаторов равной мощности с сопротивлениями X_C и трех индуктивных элементов с сопротивлением X_L , которые соединяются между собой по схеме четырёхлучевой звезды.

Мощность конденсаторов данного устройства определяется из формулы (2.26).

Общая мощность индуктивных элементов определится по формуле:

$$Q_L = U_L \cdot X_L = X_L \cdot I_N^2, \quad (5.1)$$

где U_L – напряжение на индуктивном элементе, В;

X_L – общее сопротивление индуктивных элементов, Ом;

I_N – ток в нулевом проводе, А.

Сопротивление одного индуктивного элемента X_{L1} находим из условия:

$$X_{L1} = \frac{X_C}{3} = \frac{U_\phi^2}{(3 \cdot Q_C)}, \quad (5.2)$$

где U_ϕ – фазное напряжение, В.

Тогда мощность одного индуктивного элемента:

$$Q_{L1} = U_L \cdot X_{L1} = X_{L1} \cdot I_N^2, \quad (5.3)$$

Удельные потери в конденсаторах согласно [115]:

$$p_c = 0.004 \text{ кВт/кВар}$$

Удельные потери в катушке индуктивности обратно пропорциональны ее добротности q [116]:

$$p_L = \frac{1}{q} \quad (5.4)$$

В [116] доказано, что для рассматриваемой схемы СУ q находится из условия:

$$q > 10,923 \cdot I_N \cdot Q_C^{-1} \quad (5.5)$$

Потери электрической энергии в регулируемом СУ определяются при средних полученных значениях коэффициента нулевой последовательности токов и напряжений и времени использования максимума реактивной мощности для смешанной нагрузки $T_M = 2920$ ч по формуле [117]:

$$\Delta W_{\text{СУ}} = T_M \cdot (p_c \cdot Q_c + p_L \cdot Q_{L1}) \quad (5.6)$$

Сопротивление одного индуктивного элемента X_{L1} находим по формуле (5.2):

$$Q_{L1} = 2,94 \text{ кВар.}$$

Общая мощность индуктивных элементов определяется по формуле (5.1) составит:

$$Q_L = 8,84 \text{ кВар.}$$

Общая мощность конденсаторов составит:

$$Q_C = 8,84 \text{ кВар.}$$

Стоимость регулируемого симметрирующего устройства определяется стоимостью реактивных элементов при удельной стоимости конденсаторных батарей, равных 420 руб./кВар и индуктивного элемента, 1260 руб./кВар.

Таблица 5.1 – Рыночная стоимость элементов блока управления [110].

Наименование	Цена за шт, руб	Итого
Цифровой датчик переменного напряжения, 3 шт.	315	945
Датчик тока с гальванической развязкой, 4 шт.	319	1276
Понижающее реле, 6 шт.	95	570
Аппаратная платформа на базе микроконтроллера ATmega328	600	600
Беспроводной модуль передачи данных GSM GPRS комплект платы с антенной SIM900R	240	240
ИТОГО		3631

Стоимость актуальна для момента реализации устройства.

Таким образом, стоимость на регулируемое симметрирующее устройство определится по формуле:

$$K_{су} = Q_C \cdot 420 + Q_L \cdot 1260 + C_{бу}, \quad (5.7)$$

где $C_{бу}$ – стоимость блока управления, тыс.руб.

$$K_{рсу} = 8,84 \cdot 420 + 8,84 \cdot 1260 + 3631 = 18,482 \text{ тыс. руб.}$$

5.2 Оценка экономического эффекта от внедрения РСУ в электрическую сеть ЗАО «Покровская слобода».

Для расчёта экономического эффекта от снижения потерь электроэнергии при использовании регулируемого симметрирующего устройства, прежде всего, необходимо определить плановое или фактическое снижение потерь [10]. Снижение потерь электроэнергии в сети за счет снижения коэффициента потерь от K_{PH} до K_{PK} :

$$\Delta W = \Delta W_H - \Delta W_K, \quad (5.8)$$

где ΔW_H , ΔW_K - потери электроэнергии в сети при начальной и конечной несимметрии токов, кВт·ч/год.

$$\Delta W_H = K_{PH} \cdot \Delta W_S \quad (5.9)$$

$$\Delta W_K = K_{PK} \cdot \Delta W_S, \quad (5.10)$$

где ΔW_S – потери электроэнергии в той же сети при симметричном режиме, кВт·ч/год;

K_{PH} – коэффициент потерь мощности до симметрирования;

K_{PK} – коэффициент потерь мощности после снижения несимметрии.

Из (5.8) определим потери электроэнергии в сети после снижения несимметрии токов.

$$\Delta W_K = K_{PK} \cdot \Delta W_S = K_{PK} \cdot \frac{\Delta W_H}{K_{PH}} \quad (5.11)$$

Для определения общего снижения потерь электроэнергии в результате внедрения РСУ необходимо из потерь электроэнергии в сети после снижения несимметрии ΔW вычесть потери электроэнергии в симметрирующем устройстве ΔW_{cy} [12]:

$$\Delta W_{общ} = \Delta W - \Delta W_{cy} \quad (5.12)$$

Годовая экономия от внедрения регулируемого симметрирующего устройства для снижения потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ за счёт уменьшения несимметрии токов и напряжений мощности можно определить по выражению [118]:

$$\mathcal{E}_{год} = Z_{\mathcal{E}} \cdot \Delta W_{общ}, \quad (5.13)$$

где $\Delta W_{\text{общ}}$ – общее снижение потерь в результате внедрения РСУ, тыс. кВт·ч/год;

Z_3 – стоимость 1 кВт · ч. (для сельскохозяйственных предприятий Нижегородской области $Z_3 = 9,11$ руб.).

Срок окупаемости СУ определится [11]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{KB}{\Delta W_{\text{год}} - Z_3}, \quad (5.14)$$

где KB – капитальные вложения на РСУ, тыс. руб.;

Z_3 – эксплуатационные затраты, тыс. руб.

$$KB = K_{\text{PCY}} + TP + Z_M, \text{ тыс. руб} \quad (5.15)$$

$$KB = 18,482 + 18,482 \cdot 0,2 + 18,482 \cdot 0,1 = 24,02 \text{ тыс. руб.},$$

где K_{PCY} – стоимость СУ, тыс. руб.;

TP – транспортные расходы, принимаются 20 % от стоимости РСУ, тыс. руб.;

Z_M – затраты на монтаж и установку, принимаются 10 % от стоимости РСУ, тыс. руб. [119].

$$Z_3 = A + P\Phi \quad (5.16)$$

$$Z_3 = 18,482 \cdot 0,2 + 18,482 \cdot 0,25 = 8,3105 \text{ тыс. руб.},$$

где A – амортизационные отчисления, 20 % от стоимости РСУ, тыс. руб.;

$P\Phi$ – ремонтный фонд, 25 % от стоимости РСУ, тыс. руб. [118].

5.3 Расчёт экономических показателей применения регулируемого симметрирующего устройства в электрической сети

ЗАО «Покровская слобода».

Произведём расчёт эффективности использования РСУ в ЗАО «Покровская слобода». Годовое потребление фидера 168,5 тыс. кВт·ч.

Потери электрической энергии в сельских сетях составляют 10-20 % от всей отпущенной сельскохозяйственным потребителям электроэнергии [121]. Потери электрической энергии в линиях 0,4 кВ составляют 31-33 %, а потери в трансформаторах потребительских подстанций напряжением 10/0,4 кВ 23,4 — 27,6% от общих потерь [120].

Таким образом, потери ЭЭ в линиях 0,4 кВ и трансформаторах потребительских ТП составляют 56,4 — 58,6% от общих потерь, то есть больше половины суммарных потерь в сельских сетях [1].

Потери электроэнергии в сельских сетях 0,4 кВ от отпущенной сельскохозяйственным потребителям электроэнергии [1]:

$$\Delta W_{0,4} = 18 \cdot 0,564 = 10,152.$$

Расчетное значение потерь электроэнергии в сельских сетях 0,4 кВ от отпущенной сельскохозяйственным потребителям электроэнергии принимаем 10 % и потери электроэнергии определяются [1]:

$$\Delta W = 0,1 \cdot W = 0,1 \cdot 168,5 = 16,865 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч/год}, \quad (5.17)$$

где W — годовое потребление фидера, тыс. кВт·ч/год.

На основании полученных результатов производственных испытаний рассчитано среднее значение коэффициента потерь K_{PH} составило 1,417 т.е. потери мощности при несимметричной нагрузке на 41% выше, чем при симметричной. Среднее значение коэффициента потерь K_{PK} для работы первой ступени РСУ составляет 1,16, для второй ступени 1,12 и для третьей ступени 1,1, при продолжительности времени работы ступеней $T_M = 2306, 350$ и 262 часов в год соответственно.

Таблица 5.2 – Результаты расчетов для регулируемого СУ.

Показатели	φ	p_L	$\Delta W_{СУ}$	ΔW_H	ΔW_K	$\Delta W_{СУ1}$	$\Delta W_{общ}$
Ступени СУ							
1	31	0,032	675,4	23,04	18,861	4,162	3,487
2	32	0,031	137,2	19,56	18,88	0,66	0,523
3	37	0,027	22,1	18,88	18,22	0,33	0,3

Общее снижение потерь при использовании регулируемого СУ будет складываться из общего снижения потерь для каждой из ступеней РСУ:

$$\Delta W_{общ} = \Delta W_{общСУ3} + \Delta W_{общСУ2} + \Delta W_{общСУ1}, \quad (5.18)$$

где $\Delta W_{\text{общСУ}_1}$ – общее снижение потерь электрической энергии, при работе 1 ступени мощности РСУ, тыс. кВт·ч/год;

$\Delta W_{\text{общСУ}_2}$ – общее снижение потерь электрической энергии, при работе 2 ступени мощности РСУ, тыс. кВт·ч/год;

$\Delta W_{\text{общСУ}_3}$ – общее снижение потерь электрической энергии, при работе 3 ступени мощности РСУ, тыс. кВт·ч/год.

$$\Delta W_{\text{общ}} = 3,487 + 0,523 + 0,3 = 4,31 \text{ тыс. кВт·ч/год.}$$

Годовая экономия от внедрения определится в соответствии с формулой (5.13):

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 4,31 \cdot 9,11 = 39,26 \text{ тыс. руб/год.}$$

Срок окупаемости РСУ определится по формуле (5.14):

$$T_{\text{ок}} = \frac{24,02}{39,26 - 8,3105} = 0,77 \text{ года.}$$

В среднем срок окупаемости и годовая экономия, в зависимости от мощности трансформаторной подстанции, величины несимметрии токов в сети, при использовании РСУ, будут равны соответственно 8 месяцев и 39260 рублей.

Для сравнения экономических показателей выполнен аналогичный расчет применения симметрирующего устройства с нерегулируемыми параметрами, т.е. устройства, работающего на полную мощность. $T_M = 4570$ ч.

Стоимость симметрирующего устройства определяется по формуле:

$$K_{\text{су}} = Q_c \cdot 420 + Q_L \cdot 1260, \quad (5.19)$$

где Q_c –общая мощность конденсаторных батарей, кВар;

Q_L –общая мощность индуктивного элемента, кВар.

$$K_{\text{су}} = 8,84 \cdot 420 + 2,94 \cdot 1260 = 7,417 \text{ тыс. руб.}$$

Капитальные вложения, в соответствии с формулой (5.16), составят:

$$KB = 7,417 + 7,417 \cdot 0,2 + 7,417 \cdot 0,1 = 9,64 \text{ тыс. руб.}$$

Эксплуатационные затраты определяются по формуле (5.17):

$$\mathcal{E}_3 = 7,417 \cdot 0,2 + 7,417 \cdot 0,25 = 3,33 \text{ тыс. руб.}$$

Результатом работы нерегулируемого симметрирующего устройства, является снижение значения коэффициента K_{PK} снижено до величины равной 1,25.

Таблица 5.3 – Результаты расчетов для нерегулируемого СУ.

Показатели	q	p_L	$\Delta W_{СУ}$	ΔW_H	ΔW_K	$\Delta W_{СУ1}$	$\Delta W_{общ}$
Нерегулируемое СУ	37	0,027	335,04	23,04	21,137	1,903	1,397

Таблица 5.4 – Результаты сравнения основных показателей, полученных при внедрении регулируемого и нерегулируемого СУ.

	Капитальные вложения, тыс. руб	Общее снижение потерь, $\Delta W_{общ}$, тыс. кВт·ч/год	Годовая экономия от внедрения, $\Delta W_{год}$, тыс. руб/год	Срок окупаемости, $T_{ок}$, год
Регулируемое СУ	24,02	4,31	39,26	0,77
Нерегулируемое СУ	9,64	1,397	12,56	1,04

Общее снижение потерь при использовании нерегулируемого СУ значительно ниже, чем при использовании регулируемого СУ. Разница составляет 2,913 тыс. кВт·ч/год.

Экономический эффект от применения регулируемого симметрирующего устройства увеличивается за счёт снижения потерь в самом устройстве. Это достигнуто путём рационального использования времени работы СУ в сети 0,4 кВ [11].

Вместе с этим использование регулируемого симметрирующего устройства приводит к значительному повышению качества электрической энергии. В этом случае экономический эффект точно определить достаточно трудно, так как учесть все возможные факторы (время простоя объекта, технология производства, вид выпускаемой продукции и т.д.) при работе электроприемников очень сложно [11]. По опубликованным данным [121] экономический эффект от применения симметрирующих устройств, для повышения качества электрической энергии может составлять до 8-12 % и достигать до 25 % от затрат на выпускаемую продукцию.

5.4 Выводы по главе 5

Технико-экономическое обоснование использования регулируемого симметрирующего устройства для снижения несимметрии и потерь электрической энергии в электрических сетях 0,4 кВ производилось для сельскохозяйственного объекта ЗАО «Покровская слобода». Расчеты показали, что:

1. Использование регулируемого симметрирующего устройства является эффективным и позволяет получить значительный экономический эффект.

2. Выполнен сравнительный анализ снижения потерь, при использовании регулируемого и нерегулируемого СУ. Регулируемое СУ позволяет дополнительно снизить потери электроэнергии на 2,913 тыс. кВт·ч/год. Экономический эффект от применения регулируемого симметрирующего устройства увеличивается за счёт снижения потерь в самом устройстве. Это достигнуто путём рационального использования времени работы СУ в сети 0,4 кВ.

3. Годовая экономия от внедрения регулируемого симметрирующего устройства для снижения потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ составляет 4,31 тыс. кВт·ч/год.

4. Годовой экономический эффект от внедрения одного устройства составил – 39260 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены новые решения, позволяющие снизить несимметрию токов (напряжений) и потери электрической энергии в электрических сетях 0,4 кВ. Основными результатами теоретических и практических экспериментальных исследований являются:

1. Выполненный анализ выявил, что сельские распределительные сети 0,4 кВ характеризуются значительной степенью несимметрии токов и напряжений, которые являются одной из причин дополнительных потерь электрической энергии. Выполненный анализ уровня несимметрии токов и напряжений в действующих в сельских распределительных сетях 0,4 кВ на примере отдельных сельских электрических сетей Нижегородской области показал, что среднее значение K_p составляет 1,845, то есть потери на 84,5% превышают соответствующие потери в симметричном режиме работы. Анализ технических средств симметрирования напряжений показал, что существующие симметрирующие устройства имеют ряд недостатков: высокий уровень дополнительных потерь электроэнергии, сложность и дороговизна реализации, несовершенство способов регулирования.

2. Разработан новый способ регулируемого симметрирования токов и напряжений и алгоритм его реализации. Выполнено математическое моделирование работы электрической сети 0,4 кВ с регулируемым симметрированием и разработана компьютерная программа, позволяющая определить потери электрической энергии в сети 0,4 кВ при использовании симметрирующего устройства. Теоретически обосновано, что применение регулируемого симметрирования позволяет сократить потери электроэнергии на 20% и более, и обеспечить поддержание показателей качества электроэнергии в нормированных пределах.

3. Разработано новое регулируемое симметрирующее устройство, реализующее авторский способ и алгоритм регулирования количества подключаемых ступеней, которое обеспечивает снижение потерь электрической энергии, обусловленных несимметричными режимами в электрической сети 0,4 кВ по сравнению с нерегулируемыми симметрирующими устройствами на 15%.

4. Выполненное экспериментальное исследование показало применимость разработанного способа регулируемого симметрирования токов и напряжений, а также работоспособность изготовленного экспериментального образца регулируемого СУ. Коэффициент потерь электроэнергии K_p в условиях лабораторного эксперимента снизился на 10,6 % при использовании регулируемого СУ. Лабораторный стенд внедрен в учебный процесс на кафедре «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ. Опытный образец регулируемого симметрирующего устройства для снижения несимметрии и потерь электрической энергии 0,4 кВ прошел успешные испытания в сельскохозяйственном предприятии ЗАО «Покровская слобода», а также в МУП «Княгининское ЖКХ» и ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».

5. Выполнено технико-экономическое обоснование применения регулируемого СУ в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Выполнен сравнительный анализ снижения потерь электроэнергии при использовании регулируемого и нерегулируемого СУ. Регулируемое СУ позволяет дополнительно снизить потери электроэнергии на 2,913 тыс. кВт·ч/год в электрической сети ЗАО «Покровская слобода». Экономический эффект от применения регулируемого СУ увеличивается за счёт снижения потерь в самом устройстве. Годовой экономический эффект от внедрения одного устройства составил – 39260 рублей. Срок окупаемости менее одного года.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Полученные в ходе исследования результаты рекомендуется использовать для снижения несимметрии токов (напряжений) и потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

Перспективой дальнейших исследований является разработка новых и дальнейшее совершенствование предложенных способов и технических средств снижения несимметрии, потерь и повышения качества электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ при ненормальных и аварийных режимах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гантулга, Д. Повышение качества и снижения потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ Монголии [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02 / Д. Гантулга. – Иркутск. – 215. – 190 с.
2. Бебко, И. А. Снижение потерь электрической энергии в сельском хозяйстве [Текст] / И. А. Бебко, С. Я. Меженных, В. Г. Стафийчук, В. Ю. Юрчук // Киев: Урожай. – 1981. – 120 с.
3. Савиных, В. В. Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях до 1000 В на основе метода преобразования координат симметричных и ортогональных составляющих [Текст]: дис. ... доктора технических наук 05.14.02 / В. В. Савиных. – Новочеркасск. – 2013. – 338 с.
4. Лещинская, Т. Б. Методы выбора стратегий развития систем электроснабжения сельских районов [Текст]: дис. ... доктора технических наук 05.20.02 / Т. Б. Лещинская. – Москва. – 1990. – 432 с.
5. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий [Текст]: дис. ... доктора технических наук 05.00.00 / И. В. Жежеленко. – Жданов. – 1972. – 340 с.
6. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности в узлах нагрузки электрических систем [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.14.06 / Ю. С. Железко. – Киев. – 1975. – 157 с.
7. Лукина, Г. В. Симметрирование режимов работы электрических сетей 0,38 кВ фермерских и пригородных хозяйств [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02 / Г В. Лукина. – Барнаул. – 2002. – 212 с.
8. Виноградов, А. В. Разработка принципов управления конфигурацией сельских электрических сетей и технических средств их реализации [Текст]: дис. ... доктора технических наук 05.20.02 / А. В. Виноградов. – Москва. – 2020. – 527 с.
9. Косоухов, Ф. Д. Методы расчёта, способы и средства снижения потерь электрической энергии и повышения её качества в сельских распределительных

сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке [Текст]: дис. ... доктора технических наук 05.20.02 / Ф. Д. Косоухов. – Ленинград. – 1989. – 506 с.

10. Наумов, И. В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств [Текст]: дис. ... доктора технических наук 05.20.02/ И. В. Наумов. – Иркутск. – 2002. – 387 с.

11. Сукьясов, С. В. Применение технических средств симметрирования нагрузок в сельских распределительных сетях 0,38 кВ для повышения качества и снижения потерь электрической энергии [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02/ С. В. Сукьясов. – Иркутск. – 2004. – 206 с.

12. Подьячих, Сергей Валерьевич. Нормализация качества электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке для снижения энергетических потерь [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02/ С. В. Подьячих. – Иркутск. – 2003. – 178 с.

13. Пат. 2179776, Российская Федерация, Способ снижения потерь электроэнергии в сетях низкого напряжения [Текст] / Гринкруг М. С., Поповский А. В., Соловьев В. А., Ткачева Ю. И. – 2000105315/09, заявл. 03.03.2000; опубл. 20.02.2002.

14. Егоров, М. Ю. Повышение качества электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ путем разработки устройства симметрирования и стабилизации фазных напряжений [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02/ М. Ю. Егоров. – Санкт-Петербург. – 2018. – 195 с.

15. Россети Центр и Приволжье [Электронный ресурс]. – https://mrsk-sr.ru/affiliates/nizhnovenergo/general_information/ (дата обращения 24.01.21)

16. Системный оператор единой энергетической системы. [Электронный ресурс]. – <http://so-ups.ru/> (дата обращения 18.09.19)

17. Федеральный справочник. [Электронный ресурс]. – <http://federalbook.ru> (дата обращения 18.09.19)

18. Кондраненкова Т. Е. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии при несимметричных режимах в сельских

распределительных электрических сетях [Текст] / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Кондраненкова // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Самара. – 2017. – С. 328-331.

19. Шевляков, В. И. Разработка концепции развития распределительных электрических сетей сельских территорий [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02 / В. И. Шевляков. – Москва. – 2001. – 153 с.

20. Самородов, А. В., Резервное и дополнительное электроснабжение на основе возобновляемых источников энергии [Текст] / А. В. Самородов, А. А. Трескинская, Д. А. Ефременко // Материалы III научно-практической конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет». Кубань. – 2022. – С. 296 - 298.

21. Черкасова Н. И. Основы управления техногенными рисками и эффективностью функционирования систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02 / Н. И. Черкасова. – Барнаул. – 2017. – 402 с.

22. Тюндина, Т. Е. Проблемы развития сельских электрических сетей Нижегородской области и пути их решения [Текст] / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Тюндина // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Устойчивое развитие АПК регионов: ситуация и перспективы». ФГБОУ ВПО Тверская государственная сельскохозяйственная академия. – 2015. – С. 165 - 168.

23. Положение ПАО «РОССЕТИ» о единой технической политике в электросетевом комплексе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rosseti.ru/investment/science/tech/doc/tehpolitika_29.04.2022.pdf (дата обращения 21.15.2022).

24. СТО 70238424.29.240.20.001-2011. Стандарт организации. Воздушные линии напряжением 0,4-20 кВ. Условия создания. Нормы и требования [Текст] - Москва: НП «ИНВЭЛ». – 2011. – 86 с.

25. Сайт – URL: <http://www.rstno.ru/regulatory/reshenia2017.php> (дата обращения 17.03.2021) – Текст: электронный
26. Россети Центр и Приволжье [Электронный ресурс]. – <https://mrsk-cp.ru> (дата обращения 14.03.20)
27. Скороходов, В. А. Методы и технические: средства повышения качества электроэнергии и компенсации [Текст] / В. А. Скороходов. – М.: Энергоатомиздат. – 1992. – 152
28. Тюндина, Т. Е. Несимметрия напряжений (токов) в электрических сетях 0,38 кВ [Текст] / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Тюндина // Материалы международной научной конференции «Социально-экономические проблемы развития малых муниципальных образований». ГБОУ ВО НГИЭИ. – 2014. – С. 86 - 92.
29. Кондраненкова, Т. Е. Анализ показателей качества электрической энергии и коэффициента дополнительных потерь мощности в сельских распределительных сетях 0,38 кВ [Текст] / В.В. Гузнов, Д. Е. Дулепов, Т.Е. Кондраненкова // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы». Княгинино. – 2019. – С. 213-215.
30. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] - Москва: Стандартинформ. –2014. –16 с.
31. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи: учебник для академического бакалавриата [Текст] / Л. А. Бессонов // М.: Издательство Юрайт. – 2019. – 831 с.
32. Левин, М. С. и др. Качество электрической энергии в сетях сельских районов [Текст] / Под ред. Акад. ВАСХНИЛ И. А. Будзко. М., Энергия. – 1975. – 202 с.
33. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов [Текст] / Ю. С. Железко // Москва: ЭНАС. – 2009. – 454 с.

34. Косоухов, Ф. Д. Потери мощности и напряжения в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке [Текст] / Ф.Д. Косоухов // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 3. – С. 5-8.

35. Наумов, И. В. Влияние несимметрии напряжений в электрической сети 0,38 кВ на характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя [Текст] / Наумов И.В., Шевченко М.В., Воякин С.Н. // В сборнике: Актуальные вопросы энергетики в апк. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Благовещенск. – 2020. – С. 121-138.

36. Наумов, И. В. К вопросу о возникновении пожароопасных ситуаций при несимметричном электропотреблении [Текст] / И. В. Наумов, Д. Н. Карамов // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 69 - 76.

37. Сайт – URL: <https://poisk-ru.ru/s63125t1.html> (дата обращения 21.09.2015) – Текст: электронный.

38. Косоухов, Ф. Д. Анализ показателей несимметрии и потерь мощности и напряжения в сельских распределительных сетях 0,38 кВ [Текст] / Ф. Д. Косоухов // Методы и средства повышения надежности электроснабжения, улучшения качества электроэнергии и снижения потерь ее в электрических сетях сельских районов: Сб.науч. тр.ЛСХИ,- Л. –1987. – С. 25 - 40.

39. Петров, Г. Н. Трансформаторы [Текст] / Г. Н. Петров // Москва; Ленинград: Энергоиздат. – 1934. – 446 с.

40. Шидловский, А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов // Киев: Наук. Думка. –1985. – 268 с.

41. Баркан, Я. Д. Несимметрия в сетях низкого напряжения [Текст] / Я. Д. Баркан // Электричество. – 1970. – № 3. – С. 78 - 81.

42. Баркан, Я. Д. Автоматизация регулирования напряжения в распределительных сетях [Текст] / Я. Д. Баркан; ред. Н. А. Мельников // М.: Энергия. –1971. – 231 с.

43. Кисель, О. Б. Способ повышения качества напряжения в сельских сетях [Текст] / О.Б. Кисель, Ю.Е. Шпилько // Мех. и электр. сельск.хоз. – 1980. – и 7. – С. 28 - 30.

44. Маркушевич, Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях [Текст] / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина; под ред. Н. А. Мельникова. – 2-е изд., перераб. и доп. // Москва: Энергия. – 1975. – 256 с.
45. Федулов, В. И. Симметрирование как средство снижения потерь электрической энергии в трёхфазных сетях и повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов республики [Текст] / тез. докл. республ. науч.-тех. конф.-ции. – Ташкент. – 1981. – 88 с.
46. Шишкин, С. А. Повышение эффективности энергосбережения в электросетях предприятий АПК при компенсации реактивной мощности [Текст]: дис. ... кандидат технических наук: 05.20.02 / С. А. Шишкин. – Москва. – 2004. – 149 с.
47. Герман, Л. А. Переключаемая установка поперечной емкостной компенсации в тяговых сетях переменного тока [Текст] / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, Д. Е. Дулепов // Электро. – 2011– № 3 – С. 35 - 39.
48. Серебряков, А. С. Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации с управляемыми полупроводниковыми ключами [Текст] / А. С. Серебряков, Л. А. Герман, Д. Е. Дулепов // НТТ - наука и техника транспорта. – 2012 – № 2– С. 69 -73.
49. Серебряков, А. С. Установка поперечной емкостной компенсации с трехэтапным включением [Текст] / А. С. Серебряков, Д. Е. Дулепов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013 – № 5– С. 31-33.
50. Куликовский, А. А. Системы городских распределительных сетей низкого напряжения с искусственными нейтральными точками [Текст] / А. А. Куликовский // Электричество. –1947. – № 9. – С.45-54.
51. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [Текст] / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко // Энергоатомиздат. – 2000. – 252 с.
52. Кузнецов, В. Г. Автоматическое симметрирование токов в четырёхпроводных распределительных сетях [Текст] / В. Г. Кузнецов, З. А. Новский // Проблемы техн. электродинамики. - Киев: Наук. Думка. – 1976. – № 59. – С. 60 – 65.

53. Кулинич, В. А. Индуктивно-ёмкостные управляемые трансформирующие устройства [Текст] / В. А. Кулич // Энергоатомиздат. – 1987. – 176 с.

54. Левин, М. С. Влияние разветвленности сети на соотношение потерь напряжения и потерь мощности в ней [Текст] / М.С. Левин, Т. Б. Лещинская // Электростанции. – 1997. – № 4. – С. 44-46.

55. Митин, И. А. Повышение эффективности работы электрических сетей низкого напряжения при несимметричных режимах работы [Текст]: дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / И. А. Митин. – Комсомольск-на-Амуре. – 2009. – 152 с.

56. А.С. № 458919, СССР, Устройство для компенсации реактивной мощности в многофазных распределительных сетях с нулевым проводом [Текст] / – Шидловский А. К., Кузнецов В. Г., Каплычный Н. И., Третьяк В. Т., Дятищев Б. А. (Институт электродинамики АН Украинской ССР) – № 1976908/24-7; заявлено 18.12.83, опубликовано 30.01.75 // Бюл. – 1975. – № 4.

57. Пат. 1206881, СССР, Филтросимметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, Н. Н. Каплычный, В. Б. Данилюк, А. В. Самков, О. С. Якимов – № 364394/24-07, заявл. 23.09.1983; Опубл. 23.01.1986., Бюл. №3.

58. Пат. № 119954, Российская Федерация, Устройство для повышения энергоэффективности трехфазных четырехпроводных сетей [Текст] / Юндин М. А., Ханин Ю. И., Головинов В. В., Максаев И. Н. (Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия (ФГОУ ВПО АЧГАА)). – № 2012129448/07, заявл. 12.03.2012.; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.

59. Пат. 61063, Российская Федерация, Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами [Текст] / Иванов Д. А., Наумов И.В., Шпак Д. А., Матвеев А. А., Подьячих С. В., Сукьясов С. В. (Иркутская государственная сельскохозяйственная академия Федеральное государственное образовательное учреждение высшего

профессионального образования). – № 2006110751/22, заявл. 03. 04. 2006; опубл. 10.02.2007.

60. Пат. 26699, Российская Федерация, Устройство для симметрирования токов и напряжений в трехфазной сети с нулевым проводом и саморегулируемой индуктивностью [Текст] / Лукина Г. В. , Наумов И. В., Лукин А. А. , Сукьясов С. В., Подъячих С. В. – № 200211447/20, заявл. 03.06.2002; опубл. 10.12.2002.

61. Косоухов, Ф. Д. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Горбунов, Теремецкий М. Ю. // Механизация и электрификация сел.хоз-ва. – 2014. – № 6. – С. 16-20.

62. Наумов, И. В. Оптимизация несимметричных режимов сельского электроснабжения [Текст] / И.В. Наумов. // Иркутск: ИГСХА. – 2001. – 217 с

63. Ломко, Н. А. Системы электропитания индукционных плавильных печей [Текст]: Дис. кандидата технических наук / Н.А. Ломко. – Киев. – 1995. – 161 с.

64. Наумов, И. В., Лукина Г.В., Сукьясов СВ., Подъячих С. В. Методика расчёта показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством [Текст] / Вестник АлтГАУ им И. И. Ползунова, №2. – Барнаул. – 2001. – С. 49-56.

65. А.С. 1056356, СССР, Устройство для компенсации токов обратной и нулевой последовательностей в трёхфазных четырёхпроводных электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, И. В., Мостовяк, А. В. Самков (Институт электродинамики АН Украинской ССР) – № 3494230/24-07; заявлено 30.09. 82; опубликовано 23.11.83; Бюл. – 1983. – № 43.

66. Кузнецов, В. Г. Автоматическое симметрирование токов в четырёхпроводных распределительных сетях [Текст] / В. Г. Кузнецов, З. А. Новский // Проблемы техн. электродинамики. – Киев: Наук. Думка. – 1976. № 59. – С. 60 - 65.

67. Сидоров, С. А. Регулируемое симметрирующее устройство с индуктивным накопительным элементом [Текст]: дис. кандидата технических наук.: 05.09.03 / С. А. Сидоров. – Уфа. – 2015. – 143 с.

68. Борисов, Б. П. Многофункциональное использование индуктивных и емкостных элементов в системах питания электрических печей [Текст] / Б.П. Борисов, Н.А. Ломко // Киев. – 1994. – 31 с.

69. Борисов, Б. П. Системы питания магнитодинамических установок с емкостными делителями напряжения [Текст] / Б.П. Борисов, Ю.П. Зубюк, Н.А. Ломко // Пути повышения производительности плавильно-литейных агрегатов и улучшения качества литой заготовки из цветных металлов и сплавов: тез. докл. – М.: Кольчупгао. – 1984. – С.46-51.

70. Шидловский, А. К. Оптимизация несимметричных режимов системы электроснабжения [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко // Киев: Наук. Думка. – 1987. – 176 с.

71. Гарбуз, Е. Г. Оптимизация параметров элементов систем электропитания, построенных на базе трансформаторно-тиристорных модулей силовой электроники [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.09.12 / Гарбуз Евгений Геннадьевич. – Нижний Новгород: НГТУ, 2002. – 224 с.

72. Сидоров, С. А. Проектирование трехфазного сухого трансформатора со схемой симметрирования для питания однофазной индукционной электропечи [Текст] / С. А. Сидоров, Р. Р. Исмагилов. // Межвузовский сборник научных трудов «Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования». – Уфа. УГНТУ. – 2012. – С. 152- 156.

73. Князевский, Б. А. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] / Б.А. Князевский, Б.Ю. Липкин. // Высшая школа. –1986. – 400 с.

74. Пат. 110876, Российская Федерация, Филтросимметрирующее устройство для трехфазной сети с нулевым проводом [Текст] / Ф. Д. Косоухов, А. О. Горбунов, В. А. Романов, М. Ю. Теремецкий. – № 2011117909/07, заявл. 04.05.2011; опубл. 27.11.2011., Бюл. № 33.

75. Ortuzar, M. Voltage source active power filter, based on multi-stage converter and ultracapacitor DC-link / M. Ortuzar, R. Carmi, J. Dixon, L. Morän. //IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 15-19 June 2008. – pp. 2300- 2305.

76. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст] / Г. С. Зиновьев. // Новосибирск: НГТУ. – 2004. – 199 с.
77. Пронин, М. Активные фильтры высших гармоник: направления развития [Текст] / М. Пронин. // Новости электротехники. – 2008. №1(49).
78. Розанов, Ю. К. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения [Текст] / Ю. К. Розанов, Р. П. Гринберг. // Электротехника. – 2006. № 10. – С. 55 - 60.
79. Wei-Neng, C. Design and implementation of DSTATCOM for fast load compensation of unbalanced loads / C. Wei-Neng, Y. Kuan-Dih. // Journal of Marine Science and Technology. 2009, № 4 (17). PP. 257-263.
80. Николаев, А. В. Разработка принципов управления статическим компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока [Текст]: дис. кандидата технических наук: 05.14.02 / А. В. Николаев. – СПб. – 2005. – 161 с.
81. Красник, В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях промышленных предприятий [Текст] / В.В. Красник. // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 136 с.
82. Наумов, И. В. Эффективность применения симметрирующих устройств для повышения качества и снижения потерь электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ [Текст] / И. В. Наумов, И В. Ямщикова // Вестник алтайского государственного аграрного университета. — Барнаул. – 2015 — 11 (133) — С. 113-117.
83. Голиков, И. О. Адаптивное автоматическое регулирование напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ [Текст]: дис. ... кандидата технических наук: 05.20.02 / И. О. Голиков. – Орел. – 2016. – 200 с.
84. Пат. 2527479, Российская Федерация, Способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции [Текст] / Виноградов А. В., Голиков И. О. – № 2013122161/07, заявл. 14.05.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25.
85. Пат. 2784455 Российская Федерация, Способ регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ

[Текст] / Дулепов Д. Е., Сорокин И. А., Кондраненкова Т. Е. – № 2784455; опубл. 25.11.2022; Бюл. № 33.

86. ГОСТ 29322-2014. Напряжения стандартные [Текст]: -Введ. 2015-10-01– М.: Стандартиформ. – 2015. – 13 с.

87. Попов Н. М. Аварийные режимы в сетях 0,38 кВ с глухозаземленной нейтралью [Текст] / Н. М. Попов // Кострома: изд. КГСХА. – 2005. –167 с.

88. Перова М. Б. Экономические проблемы и перспективы качественного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей в России [Текст] / М. Б. Петрова //М.: ИНП РАН. – 2007. –142 с.

89. Кондраненкова, Т. Е. Алгоритм управления фильтросимметрирующим устройством для работы в сельских электрических сетях [Текст] / Т.Е. Кондраненкова // Приоритетные научные направления: от теории к практике: сборник материалов XXXVII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Издательство ЦРНС. – 2017. – С. 102 - 108.

90. Наумов, И. В. Выбор параметров симметрирующего устройства в зависимости от изменяющихся показателей несимметрии в распределительных сетях 0,38 кВ с сосредоточенной нагрузкой [Текст] / И. В. Наумов, А. В. Пруткина // Вестник КрасГАУ. Красноярск. – 2014. – Вып. 11 – С. 186 -195.

91. Серебряков, А. С. Трансформаторы: учеб. пособие [Текст] / А.С. Серебряков. // Издательский дом МЭИ. – 2013. – 360 с.

92. Кондраненкова, Т. Е. Моделирование работы симметрирующего устройства в сельских электрических сетях в среде Simulink (Matlab) [Текст] / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Кондраненкова // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 4 (71). – С. 28-35.

93. Жилин, Е. В. Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства [Текст]: дис. ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Е. В. Жилин. – Белгород. – 2018. – 141 с.

94. Косоухов, Ф. Д. Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке: монография [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Л. Боршнин, А. О. Филиппов. // Санкт-Петербург: Лань. – 2016. – 280 с.

95. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018614901 Российская Федерация, Программа расчета показателей качества и потерь электрической энергии, обусловленных несимметричными режимами в электрической сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством (RASPOТ-1) [Текст] / Дулепов Д.Е., Кондраненкова Т.Е. – № 2018610348; заявл. 17.01.201; опубл. 19.04.2018, Бюл. № 4.

96. Дулепов, Д. Е. Переходные процессы в регулируемых установках емкостной компенсации систем тягового электроснабжения переменного тока [Текст]: дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Дулепов Дмитрий Евгеньевич. – Нижний Новгород. – 2013. – 192 с.

97. Серебряков, А.С. Исследование переходных процессов в дискретно регулируемых установках для компенсации реактивной мощности [Текст] / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, Дулепов Д.Е. // Материалы VII международной научно-практической конференции «Научный потенциал мира - 2011». Том 9. Современные технологии. София. «Бял.ГРАД-БГ» ООД. – 2011. – С. 35 – 38.

98. Правила устройства электроустановок (седьмое издание). Все действующие разделы ПУЭ-7 2021 год. Последняя редакция [Текст]: – Моркнига (все книги издательства). – 2021. – 584с.

99. Анализатор качества электроэнергии. [Электронный ресурс]. – <http://circuitor.ru/analyzers/ar5/index.php> (дата обращения 11.11.16)

100. Колемаев, В. А., Калинина, В. Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник [Текст] / Под ред. В. А. Колемаева. – М.: ИНФРА-М. – 1997. – 302 с.

101. Суслов, И.П. «Общая теория статистики». Учеб. Пособие. Изд 2-е, перераб. и доп. ... Общая теория статистики. Учебник под ред. М.Г. Назарова – М., Изд-во «Омега-Л». – 2010 – 410 с.

102. Пат. 179611, Российская Федерация, Симметрирующее устройство для трехфазной сети с нейтральным проводом [Текст] / Дулепов Д.Е., Кондраненкова Т.Е. – № 2017138146, заявл. 01.11.2017; опубл. 21.05.2018.

103. Кондраненкова, Т. Е. Силовой ключ для управления регулируемым симметрирующим устройством [Текст] / Д. Е. Дулепов, Ю. М. Дулепова, Т. Е. Кондраненкова // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (51). С. 271-276.

104. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений [Текст] / И.В. Черных; под общ.ред. В.Г. Потемкина. М.: Диалог-МИФИ. – 2004. – 491 с.

105. Тюндина, Т. Е. Модель симметрирующего устройства [Текст] / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Тюндина // Материалы XX Международной научно-практической конференции «Социально-экономические проблемы развития муниципальных образований», ГБОУ ВО НГИЭУ. – 2016. – С. 107–113.

106. Кондраненкова, Т. Е. Применение пакета Matlab Simulink для определения показателей качества электрической энергии при несимметричных режимах работы электрических сетей 0,38 кВ [Текст] / Т.Е. Кондраненкова // Материалы XI всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Чебоксары. – 2018. – С. 359 – 361.

107. Кондраненкова, Т.Е. Снижение потерь электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных сетях 0,38 кВ [Текст] / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Кондраненкова // Дальневосточный аграрный вестник. 2017, № 2 (42).

108. Кондраненкова, Т. Е. Определение оптимального количества ступеней регулируемого симметрирующего устройства [Текст] / Д. Е. Дулепов, Ю. М. Дулепова, Т. Е. Кондраненкова // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 8 (111). – С. 26-35.

109. Кондраненкова, Т. Е. Автоматизация системы управления симметрирующим устройством [Текст] / Дулепов Д. Е., Кондраненкова Т. Е., Чесноков А. Д., Толикина М. Ю. // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 8 (135). – С. 42–53.

110. Сайт. – URL: <https://all-arduino.ru/catalog/zhelezo/> (дата обращения 14.12.2020) – Текст: электронный

111. Кондраненкова, Т. Е. Результаты лабораторных исследований регулируемого симметрирующего устройства для трехфазной сети с нейтральным проводом [Текст] / Д. Е. Дулепов, Ю. М. Дулепова, Т. Е. Кондраненкова // Вестник НГИЭИ. 2019. № 8 (99). – С. 44 – 54.

112. Сайт. – URL: <https://www.vseinstrumenti.ru/electrika-i-svet/uchet-i-kontrol/avtotransformatory-latr/> (дата обращения 14.10.2017) – Текст: электронный

113. Тюндина, Т. Е. Расчёт несимметрии напряжений в СЭС [Текст] / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Тюндина // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 4(47). – С. 35-42.

114. Зиниев, Ш. З. Снижение потерь электроэнергии в сельских электрических сетях напряжением до 1000 В применением устройств компенсации реактивной мощности на полярных конденсаторах: диссертация ... кандидата технических наук [Текст]: 05.20.02 / Зиниев Шамсудин Зелимович – Саратов. – 2017. – 153.

115. Кулич В. А. Индуктивно-емкостные управляемые трансформирующие устройства [Текст] / В. А. Кулич – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 176 с.

116. Калантаров, П. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. - 2-е изд., исп. и доп. [Текст] / Калантаров, П. А., Калантаров П. А., Цейтлина Л. А. – М.: Энергия. –1970. – 415 с.

117. Мельников, Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях [Текст] / Н. А. Мельников – М.: Энергия. – 1975. – 128 с.

118. Коваленко, Н. Я. Экономика сельского хозяйства [Текст] / Н. Я. Коваленко – М.: Ассоциация авторов и издателей ТАНДЕМ: Издательство Экмос. –1999. – 448 с.

119. Коваленко, А. М. Нормы амортизационных отчислений. Учебное пособие [Текст] / А. М. Коваленко – М. – 1998. – 328 с.

120. Солдаткина, Л. А. Электрические сети и системы. Уч. пособие для вузов [Текст] / Л. А. Солдаткина – М.: Энергия. – 1978. – 216 с.

121. Лукутин, Б. В. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электроэнергии [Текст] / Лукутин, Б. В. — Томск: Изд. Курсив. – 2000. – 130 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Патенты и свидетельство

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

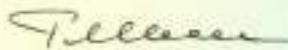
№ 179611

**СИММЕТРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ
ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ С НЕЙТРАЛЬНЫМ ПРОВОДОМ**Патентообладатель: *Дуленов Дмитрий Евгеньевич (RU)*Авторы: *Дуленов Дмитрий Евгеньевич (RU),
Кондраненкова Татьяна Евгеньевна (RU)*

Заявка № 2017138146

Приоритет полезной модели 01 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 21 мая 2018 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 01 ноября 2027 г.Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности Г.П. Измаилов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018614901

Программа расчета показателей качества и потерь электрической энергии, обусловленных несимметричными режимами в электрической сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством (RASPOТ-1)

Правообладатели: *Дулепов Дмитрий Евгеньевич (RU), Кондраненкова Татьяна Евгеньевна (RU)*

Авторы: *Дулепов Дмитрий Евгеньевич (RU), Кондраненкова Татьяна Евгеньевна (RU)*

Заявка № **2018610348**

Дата поступления **17 января 2018 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **19 апреля 2018 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Налиев Г.П. Налиев



Приложение Б. Акты внедрения

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ,
ИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИГосударственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образованияНижегородский государственный
инженерно-экономический университет
(ГБОУ ВО НГИЭУ)

606340, Нижегородская обл.

г. Княгинино, ул. Октябрьская д. 22а

тел./факс: (883166) 4-15-50, 4-02-46

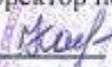
ОКПО 02536978, ОГРН 1035201235552

ИНН/КПП 5127003729/521701001

17.05.2019 № 90/20-35На № 108/13-84

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

 Касимова Ж. В.

«17» мая 2019 года



АКТ

внедрения в учебный процесс стенда, представляющего собой модель трехфазной сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством, для экспериментального исследования несимметричных режимов работы сельских электрических сетей 0,4 кВ, а так же уровня потерь и показателей качества электрической энергии
авторов Дулепова Д. Е., Кондраненковой Т.Е.

Комиссия в составе: заведующего кафедрой «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Осокина В. Л., д.т.н., профессора кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Серебрякова А. С., д.т.н., профессора кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Папкова Б. В., постановила:

1. Стенд, представляющий собой модель трехфазной сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством, для экспериментального исследования несимметричных режимов работы сельских электрических сетей 0,4 кВ, а так же уровня потерь и показателей качества электрической энергии создан для проведения научных исследований и для использования в учебном процессе по направлению подготовки «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии»), а так же в научной специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве.

2. Разработанный стенд используется для проведения комплекса учебно-практических работ, лабораторных занятий по дисциплине «Электроснабжение» для студентов, обучающихся направлению подготовки «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии»), а так же в рамках дипломного проектирования.

Заведующий кафедрой
«Электрификация и автоматизация»
к.т.н., доцент



Осокин В. Л.

Закрытое акционерное общество

«Покровская слобода»

ИНН/КПП 5217000277/521701001

606351, Нижегородская область,

Княгининский район, с. Покров, ул. Ветеранов, д.7

Р/сч. 40702810442200106110

К/сч. 30101810900000000603

БИК 042202603

Волго-Вятский Банк ПАО Сбербанк,

исх. № 01/17 от « 7 » мая 2020г.

на № 01/1 от « 21 » апреля 2020г.



Акт

о внедрении регулируемого симметрирующего устройства для снижения потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ, обусловленных несимметрией токов и напряжений

Комиссия в составе генерального директора ЗАО «Покровская слобода» Полянского М. В., кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Дулепова Д. Е. и аспиранта кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Кондраненковой Т. Е. составили настоящий акт о следующем:

1. Регулируемое симметрирующее устройство для снижения потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ, обусловленных несимметрией токов и напряжений, разработано кандидатом технических наук, доцентом, доцентом кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Дулеповым Д. Е. и аспирантом кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Кондраненковой Т. Е.

2. Проведенные испытания подтвердили заявленные характеристики устройства. Опытный образец устройства передан для опытной эксплуатации в ЗАО «Покровская слобода» для выявления его эксплуатационных характеристик и внедрения его в производство.

Акт составили:

ЗАО «Покровская слобода»

Генеральный директор

М. В. Полянский

со стороны разработчиков:

доцент кафедры
«Электрификация и автоматизация»
ГБОУ ВО НГИЭУ
к.т.н., доцент

Д. Е. Дулепов

аспирант кафедры
«Электрификация и автоматизация»
ГБОУ ВО НГИЭУ

Т. Е. Кондраненкова

Муниципальное унитарное предприятие
«Княгининское
жилищно-коммунальное хозяйство»
ИНН 5217000037
606340, Нижегородская область,
Княгининский район,
г. Княгинино, ул. Аграрная, д. 2

УТВЕРЖДАЮ

генеральный директор

Муниципальное Унитарное

Предприятие «Княгининское Жилищно-
коммунальное хозяйство»

Ургансков А. В.

А. В. Ургансков 20.05.2018 г.



Акт

о внедрении симметрирующего устройства для снижения потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ, обусловленных несимметрией токов и напряжений

Настоящим актом подтверждается, что электротехническое устройство «Симметрирующее устройство для трехфазной сети с нейтральным проводом» патент на полезную модель № 179611 от 21.05.2018, разработанное авторами: Дулеповым Д. Е., Кондраненковой используется в МУП «Княгининское ЖКХ», для снижения потерь электрической энергии, обусловленных несимметрией токов и напряжений, в сельских электрических сетях г. Княгинино 0,4 кВ.

Выполненный анализ потерь и качества электроэнергии в сети 0,4 кВ показал, что при внедрении устройства, несимметрия токов и напряжений в сети 0,4 кВ снижается, тем самым уменьшаются потери и повышается качество электрической энергии. Коэффициент потерь K_p уменьшается на 19%, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности K_{2U} и K_{0U} на 20%.

Акт составили:

директор МУП «Княгининское ЖКХ»

А. В. Ургансков

со стороны разработчиков:

доцент кафедры
«Электрификация и автоматизация»
ГБОУ ВО НГИЭУ
к.т.н., доцент

Д. Е. Дулепов

аспирант кафедры
«Электрификация и автоматизация»
ГБОУ ВО НГИЭУ

Т. Е. Кондраненкова

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ,
ИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет
(ГБОУ ВО НГИЭУ)

606340, Нижегородская обл.
г. Княгинино, ул. Октябрьская д. 22а
тел./факс: (883166) 4-15-50, 4-02-46
ОКПО 02536978, ОГРН 1035201235552

ИНН/КПП 5127003729/521701001
21.05.2019 № 96/26-35
На № 84/17-28 от 7.04.19

УТВЕРЖДАЮ

Главный энергетик

ГБОУ ВО «Нижегородский
государственный инженерно-
экономический университет»

Капусткин А.А.

Мил 2019 г.



Акт

о внедрении регулируемого симметрирующего устройства для снижения потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ, обусловленных несимметрией токов и напряжений

Комиссия в составе главного энергетика ГБОУ ВО НГИЭУ Капусткина А.А., кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Дулепова Д. Е. и соискателя кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Кондраненковой Т. Е. составили настоящий акт о следующем:

1. Регулируемое симметрирующее устройство для снижения потерь электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ, обусловленных несимметрией токов и напряжений, разработано кандидатом технических наук, доцентом, доцентом кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Дулеповым Д. Е. и соискателем кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ Кондраненковой Т. Е.
2. Опытный образец устройства прошел производственные испытания.

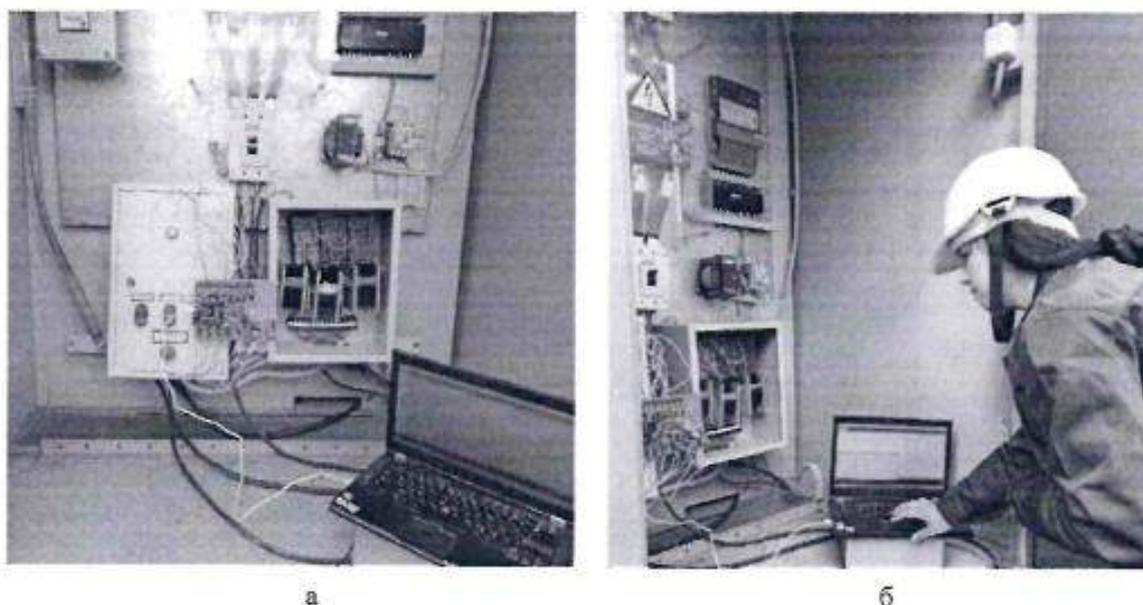


Рис.1 – Производственные испытания

а – установка регулируемого симметрирующего устройства в КТП ГБОУ ВО НГИЭУ, фидер 3 - общежитие;

б – снятие показателей результатов производственных испытаний

3. Выполненный анализ потерь и качества электроэнергии в сети 0,4 кВ показал, что при внедрении устройства несимметрия токов и напряжений в сети 0,4 кВ снижается, тем самым уменьшаются потери и повышается качество электрической энергии.

Акт составили:

ГБОУ ВО НГИЭУ

Главный энергетик

А. А. Капусткин

со стороны разработчиков:

доцент кафедры

«Электрификация и автоматизация»

ГБОУ ВО НГИЭУ

к.т.н., доцент

Д. Е. Дулепов

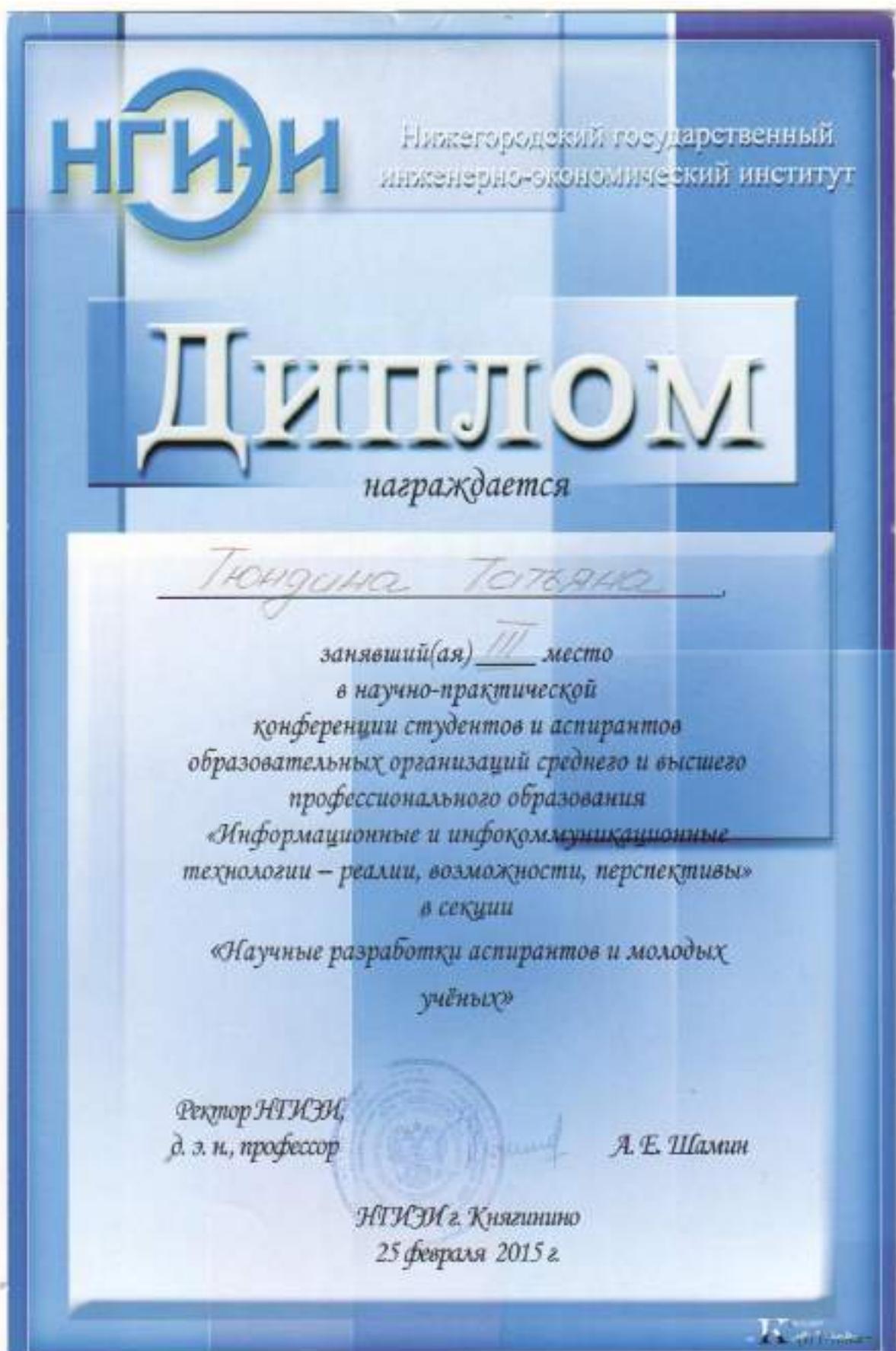
соискатель кафедры

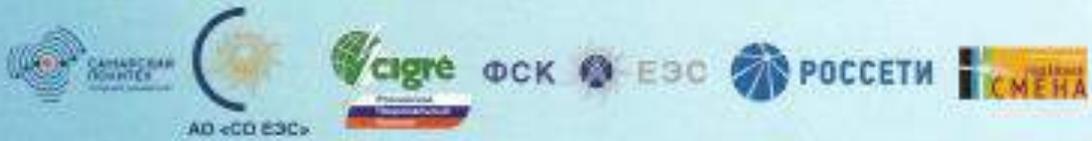
«Электрификация и автоматизация»

ГБОУ ВО НГИЭУ

Т. Е. Кондраненкова

Приложение В. Дипломы и сертификаты





ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Кондраненкова Татьяна Евгеньевна

за III место
в VIII Международной молодежной
научно-технической конференции

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2017

Сопредседатель Оргкомитета,
Ректор СамГТУ



Д.Е. Быков

Самара, 2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное
 учреждение высшего образования
 «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

Настоящий сертификат удостоверяет, что

**Кондраненкова
Татьяна Евгеньевна**
 (ГБОУ ВО НГИЭУ, г. Княгинино)

участвовала в XI Всероссийской
научно-технической конференции

**«ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ» (ИТЭЭ-2018)**

с докладом «Применение пакета Matlab Simulink
для определения показателей качества электрической
энергии при несимметричных режимах работы
электрических сетей 0,38 кВ»

Ректор ФГБОУ ВО
«ЧГУ им. И.Н. Ульянова»



Александров А.Ю.

Чебоксары, 7-9 июня 2018 г.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»



СЕРТИФИКАТ

участнику
Международной научно-практической
конференции
«Энергообеспечение АПК»

Кондраненковой Татьяне Евгеньевне

Председатель оргкомитета
заместитель директора ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
профессор РАН, академик РАН



А.С. Дорохов

15-16 ДЕКАБРЯ 2022 г.
Москва, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Приложение Г. Программа управления РСУ

```

#include <SoftwareSerial.h>
#include "DHT.h"
#include "Math.h"
SoftwareSerial grs(7, 8);
#define GSMbaud 9600
#define PHONE_NUMBER "+79870843319"
String str1;
char buff[100];
double sensorValue1 = 0;
double sensorValue2 = 0;
double sensorValue3 = 0;
int crosscount = 0;
int climb_flag = 0;
int val[100];
int max_v = 0;
int n_v = 220;
double VmaxD = 0;
double VeffD = 0;
double Veff = 0;
int analogPin1 = A3;
int analogPin2 = A4;
int analogPin3 = A5;
const int averageValue = 500;
long int sensorValue = 0;
float voltage = 0;
float current = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  gsm.begin(GSMbaud);
  Serial.println("Start");
}
void loop() {
  for ( int i = 0; i < 100; i++ ) {
    sensorValue1 = analogRead(A0);
    if (analogRead(A0) > 511) {
      val[i] = sensorValue1;
    }
    else {
      val[i] = 0;
    }
    delay(1);
  }
  max_v = 0;
  for ( int i = 0; i < 100; i++ )
  {
    if ( val[i] > max_v )
    {
      max_v = val[i];
    }
    val[i] = 0;
  }
}

```

```

}
if (max_v != 0) {
    VmaxD = max_v;
    VeffD = VmaxD / sqrt(2);
    Veff = (((VeffD - 420.76) / -90.24) * -187) + 187;
}
else {
    Veff = 0;
}
Serial.print("Voltage1: ");
Serial.println(Veff);
VmaxD = 0;
delay(100);
for ( int i = 0; i < 100; i++) {
    sensorValue1 = analogRead(A1);
    if (analogRead(A1) > 511) {
        val[i] = sensorValue2;
    }
    else {
        val[i] = 0;
    }
    delay(1);
}
max_v = 0;
for ( int i = 0; i < 100; i++)
{
    if ( val[i] > max_v )
    {
        max_v = val[i];
    }
    val[i] = 0;
}
if (max_v != 0) {
    VmaxD = max_v;
    VeffD = VmaxD / sqrt(2);
    Veff = (((VeffD - 420.76) / -90.24) * -187) + 187;
}
else {
    Veff = 0;
}
Serial.print("Voltage2: ");
Serial.println(Veff);
VmaxD = 0;
delay(100);
for ( int i = 0; i < 100; i++) {
    sensorValue1 = analogRead(A2);
    if (analogRead(A2) > 511) {
        val[i] = sensorValue3;
    }
    else {
        val[i] = 0;
    }
}

```

```

    delay(1);
}
max_v = 0;
for ( int i = 0; i < 100; i++)
{
    if ( val[i] > max_v )
    {
        max_v = val[i];
    }
    val[i] = 0;
}
if (max_v != 0) {
    VmaxD = max_v;
    VeffD = VmaxD / sqrt(2);
    Veff = (((VeffD - 420.76) / -90.24) * -187) + 187;
}
else {
    Veff = 0;
}
Serial.print("Voltage3: ");
Serial.println(Veff);
VmaxD = 0;
delay(100);
    for ( int i = 0; i < 100; i++) {
        sensorValue1 = analogRead(A0);
        if (analogRead(A0) > 511) {
            val[i] = sensorValue1;
        }
        else {
            val[i] = 0;
        }
        delay(1);
    }
    testimony1 = 0;
    testimony2 = 0;
    testimony3 = 0;
    while (let testimony1 = sensorValue1; testimony1 < 209);
    count << testimony1 << testimony1 > 209);
    while (let testimony2 = sensorValue2; testimony2 < 209);
    count << testimony2 << testimony2 > 209);
    while (let testimony3 = sensorValue3; testimony3 < 209);
    count << testimony3 << testimony3 > 209);
    max_v = 0;
    for ( int i = 0; i < 100; i++)
    {
        if ( val[i] > max_v )
        {
            max_v = val[i];
        }
        val[i] = 0;
    }
    if (max_v != 0) {

```

```

    VmaxD = max_v;
    VeffD = VmaxD / sqrt(2);
    Veff = (((VeffD - 420.76) / -90.24) * -210.2) + 210.2;
}
else {
    Veff = 0;
}
Serial.print("Voltage1: ");
Serial.println(Veff);
VmaxD = 0;
delay(100);
for ( int i = 0; i < 100; i++ ) {
    sensorValue2 = analogRead(A1);
    if (analogRead(A1) > 511) {
        val[i] = sensorValue2;
    }
    else {
        val[i] = 0;
    }
    delay(1);
}
max_v = 0;
for ( int i = 0; i < 100; i++ )
{
    if ( val[i] > max_v )
    {
        max_v = val[i];
    }
    val[i] = 0;
}
if (max_v != 0) {
    VmaxD = max_v;
    VeffD = VmaxD / sqrt(2);
    Veff = (((VeffD - 420.76) / -90.24) * -210.2) + 210.2;
}
else {
    Veff = 0;
}
Serial.print("Voltage2: ");
Serial.println(Veff);
VmaxD = 0;
delay(100);
for ( int i = 0; i < 100; i++ ) {
    sensorValue3 = analogRead(A2);
    if (analogRead(A2) > 511) {
        val[i] = sensorValue3;
    }
    else {
        val[i] = 0;
    }
    delay(1);
}
}

```

```

max_v = 0;
for ( int i = 0; i < 100; i++)
{
  if ( val[i] > max_v )
  {
    max_v = val[i];
  }
  val[i] = 0;
}
if (max_v != 0) {
  VmaxD = max_v;
  VeffD = VmaxD / sqrt(2);
  Veff = (((VeffD - 420.76) / -90.24) * -210.2) + 210.2;
}
else {
  Veff = 0;
}
Serial.print("Voltage3: ");
Serial.println(Veff);
VmaxD = 0;
delay(100);
for (int i = 0; i < averageValue; i++)
{
  sensorValue1 += analogRead(analogPin1);
  delay(200);
}
{
  sensorValue1 = sensorValue / averageValue;
  voltage1 = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
  current1 = (voltage - 2.5) / 0.185;
  deviation1 = 220 - (220 * 0.05);
  min_deviation1 = 220 - (220 * 0.05);
  for (testimony1 > deviation1);
  {
  else (testimony1 < (sensorValue1 + min_deviation1));
  Serial.print("ADC Value: ");
  Serial.print(sensorValue1);
  Serial.print("  ADC Voltage: ");
  Serial.print(voltage1);
  Serial.print("V");
  Serial.print("  Current: ");
  Serial.print(current1);
  Serial.println("A");
  for (int i = 0; i < averageValue; i++)
  {
    sensorValue2 += analogRead(analogPin2);
    delay(200);
  }
  testimony1_step1 = testimony1 + (220 * 0.05);
  sensorValue2 = sensorValue / averageValue;
  voltage = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
  current2 = (voltage - 2.5) / 0.185;
}

```

```

deviation1 = 220 - (220 * 0.05);
min_deviation1 = 220 - (220 * 0.05);
  for (testimony1_step1 > deviation1);
  {
else {testimony1_step1 < (sensorValue1 + min_deviation1)}break;
  delay(200);
  }
Serial.print("ADC Value: ");
Serial.print(sensorValue1);
Serial.print("  ADC Voltage: ");
Serial.print(voltage);
Serial.print("V");
  Serial.print("  Current: ");
Serial.print(current2);
Serial.println("A");
for (int i = 0; i < averageValue; i++)
  {
  sensorValue3 += analogRead(analogPin3);
  delay(200);
  }
  sensorValue3 = sensorValue / averageValue;
voltage = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
current3 = (voltage - 2.5) / 0.185;
deviation1 = 220 - (220 * 0.05);
min_deviation1 = 220 - (220 * 0.05);
  for (testimony1_step2 > deviation1);
  {
else {testimony1_step2 < (sensorValue1 + min_deviation1)}break;
  delay(200);
  Serial.print("ADC Value: ");
Serial.print(sensorValue3);
  Serial.print("  ADC Voltage: ");
Serial.print(voltage);
Serial.print("V");
  Serial.print("  Current: ");
Serial.print(current3);
Serial.println("A");
  for (int i = 0; i < averageValue; i++)
  {
  sensorValue3 += analogRead(analogPin3);
  delay(200);
  }
  }
  {
sensorValue2 = sensorValue / averageValue;
voltage2 = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
current2 = (voltage - 2.5) / 0.185;
deviation2 = 220 - (220 * 0.05);
min_deviation2 = 220 - (220 * 0.05);
  for (testimony2 > deviation2);
  {

```

```

else (testimony2 < (sensorValue2 + min_deviation2));
  Serial.print("ADC Value: ");
  Serial.print(sensorValue2);
  Serial.print("  ADC Voltage: ");
  Serial.print(voltage2);
  Serial.print("V");
  Serial.print("  Current: ");
  Serial.print(current2);
  Serial.println("A");
  for (int i = 0; i < averageValue; i++)
  {
    sensorValue2 += analogRead(analogPin2);
    delay(200);
  }
testimony2_step1 = testimony2 + (220 * 0.05);
  sensorValue1 = sensorValue / averageValue;
  voltage1 = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
  current1 = (voltage - 2.5) / 0.185;
  deviation2 = 220 - (220 * 0.05);
  min_deviation2 = 220 - (220 * 0.05);
  for (testimony2_step1 > deviation2);
  {
  else {testimony2_step1 < (sensorValue2 + min_deviation2)}break;
    delay(200);
  }
  Serial.print("ADC Value: ");
  Serial.print(sensorValue3);
  Serial.print("  ADC Voltage: ");
  Serial.print(voltage);
  Serial.print("V");
  Serial.print("  Current: ");
  Serial.print(current3);
  Serial.println("A");
  for (int i = 0; i < averageValue; i++)
  {
    sensorValue3 += analogRead(analogPin3);
    delay(200);
  }
  sensorValue3 = sensorValue / averageValue;
  voltage = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
  current3 = (voltage - 2.5) / 0.185;
  deviation2 = 220 - (220 * 0.05);
  min_deviation2 = 220 - (220 * 0.05);
  for (testimony2_step2 > deviation2);
  {
  else {testimony2_step2 < (sensorValue2 + min_deviation2)}break;
    delay(200);
  }
  Serial.print("ADC Value: ");
  Serial.print(sensorValue3);
  Serial.print("  ADC Voltage: ");
  Serial.print(voltage);
  Serial.print("V");

```

```

Serial.print(" Current: ");
Serial.print(current3);
Serial.println("A");
  for (int i = 0; i < averageValue; i++)
  {
    sensorValue3 += analogRead(analogPin3);
    delay(200);
  }
}
{
sensorValue3 = sensorValue / averageValue;
voltage3 = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
current3 = (voltage - 2.5) / 0.185;
deviation3 = 220 - (220 * 0.05);
min_deviation3 = 220 - (220 * 0.05);
for (testimony3 > deviation3);
{
else (testimony3 < (sensorValue3 + min_deviation3));
Serial.print("ADC Value: ");
Serial.print(sensorValue3);
Serial.print(" ADC Voltage: ");
Serial.print(voltage3);
Serial.print("V");
Serial.print(" Current: ");
Serial.print(current3);
Serial.println("A");
for (int i = 0; i < averageValue; i++)
{
  sensorValue3 += analogRead(analogPin2);
  delay(200);
}
testimony3_step1 = testimony3 + (220 * 0.05);
sensorValue3 = sensorValue / averageValue;
voltage = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
current3 = (voltage - 2.5) / 0.185;
deviation3 = 220 - (220 * 0.05);
min_deviation3 = 220 - (220 * 0.05);
  for (testimony3_step1 > deviation1);
  {
else {testimony3_step1 < (sensorValue1 + min_deviation1)}break;
  delay(200);
}
Serial.print("ADC Value: ");
Serial.print(sensorValue3);
Serial.print(" ADC Voltage: ");
Serial.print(voltage3);
Serial.print("V");
  Serial.print(" Current: ");
Serial.print(current3);
Serial.println("A");
for (int i = 0; i < averageValue; i++)

```

```

{
    sensorValue1 += analogRead(analogPin1);
    delay(200);
}
sensorValue1 = sensorValue / averageValue;
voltage1 = sensorValue * 5.0 / 1024.0;
current1 = (voltage - 2.5) / 0.185;
deviation3 = 220 - (220 * 0.05);
min_deviation3 = 220 - (220 * 0.05);
for (testimony3_step2 > deviation1);
{
else {testimony3_step2 < (sensorValue1 + min_deviation1)}break;
    delay(200);
    Serial.print("ADC Value: ");
Serial.print(sensorValue3);
    Serial.print("  ADC Voltage: ");
Serial.print(voltage);
Serial.print("V");
    Serial.print("  Current: ");
Serial.print(current3);
Serial.println("A");
    for (int i = 0; i < averageValue; i++)
{
    sensorValue3 += analogRead(analogPin3);
    delay(200);
}
}
if (Serial.available()) {
    str1 = Serial.readStringUntil('\n');
    str1.toCharArray(buffer, hh.length() + 1);
    gsm.write(buffer);
    gsm.board.write('\n');
}
if (gsm.available()) {
    Serial.write(gprs.read());
}
if (millis()-millisend>15*1000)
{
    int V1 = sensorValue1.readVoltage1();
    int V2 = sensorValue2.readVoltage2();
    int V3 = sensorValue3.readVoltage3();
    int I1 = sensorValue1.readcurrent1();
    int I2 = sensorValue2.readcurrent2();
    int I3 = sensorValue3.readcurrent3();
}
}
void SendSMS(int t) {
    gsm.print("AT+CMGF=1\r");
    delay(100);
    gsm.println("AT + CMGS = \");
    gsm.println(PHONE_NUMBER);
    gsm.println("Отклонение напряжения выше -5%");
}

```

```
delay(50);
gsm.println(V1);
delay(50);
gsm.println((char)26);
delay(50);
gsm.println();
gsm.println(V2);
delay(50);
gsm.println((char)26);
delay(50);
gsm.println();
gsm.println(V3);
delay(50);
gsm.println((char)26);
delay(50);
gsm.println();
gsm.println(I1);
delay(50);
gsm.println((char)26);
delay(50);
gsm.println();
gsm.println(I2);
delay(50);
gsm.println((char)26);
delay(50);
gsm.println();
gsm.println(I3);
delay(50);
gsm.println((char)26);
delay(50);
gsm.println();
}
```